

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**METODOLOGIA DE DOSAGEM RACIONAL DO  
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR) USANDO  
CINZA VOLANTE DE CARVÃO E CAL HIDRATADA EM  
SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND**

José Eduardo Corrêa Mallmann

Porto Alegre  
2018

**JOSÉ EDUARDO CORRÊA MALLMANN**

**METODOLOGIA DE DOSAGEM RACIONAL DO  
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR) USANDO  
CINZA VOLANTE DE CARVÃO E CAL HIDRATADA EM  
SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia

**Porto Alegre**

**2018**

Mallmann, José Eduardo Corrêa  
METODOLOGIA DE DOSAGEM RACIONAL DO CONCRETO  
COMPACTADO COM ROLO(CCR) USANDO CINZA VOLANTE E CAL  
HIDRATADA EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND / José  
Eduardo Corrêa Mallmann. -- 2018.

223 f.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Coorientadora: Karla Salvagni Heineck.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS,  
2018.

1. Resíduos da queima do carvão mineral. 2. Cinzas  
volante e de fundo. 3. Cal hidratada. 4. Concreto  
Compactado com Rolo - CCR. I. Consoli, Nilo Cesar,  
orient. II. Heineck, Karla Salvagni, coorient. III.

Título.

**JOSÉ EDUARDO CORRÊA MALLMANN**

**METODOLOGIA DE DOSAGEM RACIONAL DO CONCRETO  
COMPACTADO COM ROLO (CCR) USANDO CINZA VOLANTE DE  
CARVÃO E CAL HIDRATADA EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO  
PORTLAND**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Concentração, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 27 de fevereiro de 2018

Nilo Cesar Consoli  
Ph.D. Concordia University - Canada  
PPGEC-UFRGS  
orientador

Profa. Karla Salvagni Heineck  
Dra. PPGEC-UFRGS  
PPGEC-UFRGS  
co-orientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Samir Maghous (PPGEC-UFRGS)**  
Ph.D. pela École Nationale Des Ponts Et Chaussées (França)

**Prof. Antônio Thomé (Universidade de Passo Fundo)**  
Dr.Sc. pelo PPGEC-UFRGS

**Prof. Vitor Pereira Faro (Universidade Federal do Paraná)**  
Dr.Sc. pelo PPGEC-UFRGS

**Prof. João Rodrigo Guerreiro Mattos (UNIVATES)**  
Dr.Sc. pelo PPGEC-UFRGS

*Aos meus pais José Brito Mallmann (in memoriam) e Alba Corrêa Mallmann, que dignamente me apresentaram à importância da família e ao caminho da honestidade e persistência.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me presentear com a vida de Anna Carolina, minha filha, hoje um ser humano que transborda alegria e vive intensamente as curiosas descobertas da adolescência;

Ao amigo e professor Nilo Consoli, pelo convite para entrar no pós-graduação e poder terminar o doutorado. Pela sua dedicação que apresenta com cada aluno. O meu respeito e enorme admiração por sua conduta, nos diversos momentos que se sucederam, até a conclusão desta importante etapa da minha vida. Muito obrigado;

A professora Karla pela sua inestimável ajuda nas correções e sugestões desta tese;

Aos meus amigos do Departamento de Geotecina da CIENTEC, Marco, Gilnei, Roberto e Luciana por seu apoio e incentivo.

Aos meus colegas Laboratoristas do Laboratório de solos e rochas, Amaral, Teylor, Neco, Everton, Wladimir, Mauro e Gabriel por sua inestimável ajuda nos ensaios laboratoriais;

Aos colegas Ricardo e Recena do Departamento de Materiais e Construção Civil e os laboratorista nunca se negando as minhas solicitações de ensaios;

Ao meu amigo professor José Tadeu Balbo, seus ensinamentos em pavimento muito me valeram neste trabalho de pesquisa e tudo começou com sua idéia de propor o uso dos resíduos da queima do carvão no Concreto Compactado com Rolo-CCR, muito obrigado;

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Fundação de Ciência e Tecnologia por disponibilizarem a infra-estrutura para obtenção do título de Doutor em Engenharia;

A Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica – CGTEE, por disponibilizar toda a matéria prima (cinzas volante e de fundo) necessárias para este trabalho de pesquisa;

Aos meus amigos Alexandre Fontenelle, Taís Sanchet e Rodrigo Saldanha sempre pelo seu estimado apoio. Obrigado;

A todas as pessoas que diretamente ou indiretamente contribuíram para conclusão de minha tese de doutora, a todos muito obrigado.

**“Pensamos demasiadamente e sentimos muito pouco. Necessitamos mais de humildade que de máquinas. Mais de bondade e ternura que de inteligência. Sem isso, a vida se tornará violenta e tudo se perderá”**

(Charles Chaplin)

## RESUMO

MALLMANN, J.E.C. **Metodologia de dosagem racional do concreto compactado com rolo (CCR) usando cinza volante de carvão e cal hidratada em substituição ao cimento Portland.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

No Brasil, a malha rodoviária pavimentada, em sua grande maioria, é de revestimentos de misturas asfálticas. Com o crescimento do carregamento imposto pelo tráfego às rodovias, a vida útil destes revestimentos tendem a reduzir com o aparecimento excessivo de trincas e afundamento da estrutura. Uma das formas de combater o aparecimento destas patologias, causadas por fatores externos, seria a execução de camadas cimentadas subjacentes aos revestimentos asfálticos. Paralelamente, é observada uma crescente preocupação com o meio ambiente, na questão dos rejeitos originários de processos industriais, seja no seu descarte e seu uso e as explorações de materiais naturais para aplicação na construção civil. Atualmente, há um esforço, cada vez maior, das universidades e instituições de pesquisa para que novas tecnologias e materiais utilizados se aproveitem dos rejeitos gerados pelos processos industriais. A região sul, mais particularmente, no Estado do Rio Grande do Sul, estão localizados, aproximadamente, 92% das jazidas de carvão mineral conhecidas no Brasil, de baixo poder calorífico, como consequência, foram implantadas termelétricas à carvão para geração de energia e neste processo, são gerados resíduos da queima do carvão: cinzas volante (fly ash) e de fundo (bottom ash). Neste trabalho foram estudados os resíduos gerados da Termelétrica Presidente Médici, Fase B, pertencente a Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE), localizada no município de Candiota-RS para aplicação em pavimento, mais particularmente no Concreto Compactado com Rolo (CCR). A principal finalidade foi substituir o cimento Portland por cinza volante adicionada de cal hidratada e através de uma metodologia racional, que é a relação da porosidade( $\eta$ ) e o teor volumétrica da cal, verificar sua influência nas propriedades mecânicas do CCR (compressões simples e diametral, resistência à tração na flexão, bem como os módulos de elasticidade estático e dinâmico), variando a energia de compactação e os teores de cal (5%, 10%, 15% e 20%). Os resultados mostram que para todas as propriedades mecânicas esta metodologia racional obteve os mesmos valores de expoentes internos e externos dentro de seu modelo matemático de previsão destas propriedades mecânicas e uma boa relação entre os modelos matemáticos da compressão simples e compressão diametral e resistência à tração na flexão, bem como uma boa relação entre os modelos matemáticos dos módulos de elasticidade estático e dinâmico.

Palavras-chave: resíduos; cinzas volante e de fundo, carvão mineral; concreto compactado com rolo-CCR; cal hidratada.



## ABSTRACT

MALLMANN, J.E.C. **Rational dosage Methodology for roller-compacted concrete (RCC) using coal fly ash and hydrated lime in place of Portland cement.** 2018. Thesis (PhD in Engineering) - PPGEC / UFRGS, Porto Alegre.

In Brazil the paved road network, for the most part, is made of asphalt mixtures. With the growth of the load imposed by the traffic to the highways, the useful life of these asphaltic coating tend to reduce with the excessive appearance of cracks and sinking of the structure. One of the ways to combat the appearance of these pathologies, caused by external factors, would be the execution of cemented layers underlying the asphaltic coatings. At the same time, there is a growing concern with the environment in the issue of waste originating from industrial processes, either in their disposal and their use and the exploration of natural materials for application in civil construction. Currently, there is a growing effort by universities and research institutions to make use of the new technologies and use inorganic wastes from industrial processes that contributing to the sustainability, which includes: the economic, social and environmental aspects. The southern region, more particularly, in the state of Rio Grande do Sul, is located approximately 92% of the coal deposits known in Brazil, of low calorific value, as a consequence, coal-fired thermoelectric plants have been implemented for power generation and in this process, wastes are generated, such as coal fly ash and coal bottom ash. This aim of this thesis is to study the use of this waste generated by the Presidente Médici Thermoelectric Plant, Phase B, which is part of the Thermal Power Generation Company (CGTEE), located in the city of Candiota-RS for application in pavement, more particularly in Roller-Compacted Concrete (RCC). The main purpose was to replace the Portland cement with fly ash added with hydrated lime and through a rational methodology, which is the relation of the porosity ( $\eta$ ) and the volumetric content of the lime ( $L_v$ ), to verify its influence on the mechanical properties of the CCR (compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength and static and dynamic modulus of elasticity), varying the compaction energy and lime contents (5%, 10%, 15% and 20%). The results show that for all the mechanical properties this rational methodology obtained the same values of internal and external exponents within its mathematical model of prediction of these mechanical properties and a good relation between the mathematical models of the simple compression and splitting tensile strength, flexural strength in the as well as a good relation between the mathematical models of static and dynamic elastic moduli.

**Keywords:** waste; fly ash and bottom ash; mineral coal; roller-compacted concrete RCC; hydrated lime.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Tipos de carvão, reservas e usos.....	32
Figura 2 -	Uso e descarte dos produtos da combustão do carvão na Europa em 2008.....	36
Figura 3 -	Uso da cinza volante na indústria da construção e minas subterrâneas em 2008 .....	37
Figura 4 -	Uso da cinza de fundo na indústria da construção e minas subterrâneas em 2008 .....	38
Figura 5 -	Uso da escória de caldeira na indústria da construção e no jateamento de areias .....	39
Figura 6 -	Uso da cinza da combustão em leito fluidizado na indústria da construção e em minas subterrâneas.....	40
Figura 7 -	Uso do FGD-Gypsum na indústria da construção. ....	41
Figura 8 -	Empreendimentos futuros e em operação de Termelétricas Fonte: Autor (2017) .....	42
Figura 9 -	Lagoa de disposição de cinzas volantes da Usina Termelétrica de São Jerônimo - RS, na década de 1990. ....	47
Figura 10 -	Cavas de minas de carvão exauridas parcialmente preenchidas por cinzas geradas na usina termelétrica Presidente Médici em Candiota – RS, na década de 1980.....	47
Figura 11 -	Aterro estradal, entre os municípios de São Jerônimo - RS e General Câmara - RS, construído com cinzas das Usinas Termelétricas de Charqueadas-RS e São Jerônimo – RS, na década de 1990.....	48
Figura 12 -	Pavimento de base de cinza volante e cal hidratada no Polo Petroquímico de Triunfo, 6 km – CICASOL. ....	51
Figura 13 -	Casa de blocos cinza/cal construída na Vila tecnológica no Município de Porto Alegre em 2003 – CINCAL. ....	51
Figura 14 -	Fluxograma simplificado: Carvão Pulverizado. ....	53
Figura 15 -	Foto da cinza volante pelo MEV .....	59
Figura 16 -	Camada molecular do nitrogênio adsorvido estimada através do método BET.....	63
Figura 17 -	Faixas granulométricas do CCR.....	71

Figura 18 -	Curva de compactação do CCR para consumo de cimento de 120kg/m <sup>3</sup> .....	72
Figura 19 -	Mesa vibratória VEBE para medir a consistência do CCR, teste método A(ASTM C 1170/C 1170M:2014) .....	74
Figura 20 -	Esquema do ensaio e representação do rompimento por resistência à tração por compressão diametral .....	84
Figura 21 -	Esquema de ensaio da resistência à tração na flexão, dois cutelos.....	86
Figura 22 -	Caso de ruptura no terço médio ou fora deste e diagrama dos esforços solicitantes no terço médio, dois cutelos. ....	86
Figura 23 -	Diagrama dos esforços solicitantes no terço médio, um cutelo.....	88
Figura 24 -	Tipos de módulo de elasticidade. ....	90
Figura 25 -	Influência do módulo de elasticidade em função do teor de agregado na mistura .....	92
Figura 26 -	Efeito da dimensão máxima característica do agregado graúdo no módulo de elasticidade médio do concreto .....	93
Figura 27 -	Desenho esquemático do ensaio de tração na flexão com suporte “yoke” e LVDT para medida da deformação. ....	95
Figura 28 -	Corpos de prova prismático com medições por LVDT no centro do vão da vigota (Fig-28A) e com strain gage fixado na face inferior (Figura 28B). ....	96
Figura 29 -	Relação entre módulos de elasticidade estático medidos em corpo de provas estáticos.....	97
Figura 30 -	Resultados dos Módulos de elasticidade pela curva tensão x deformação (SG) e por analogia de Mohr (LVDT).....	98
Figura 31 -	Transmissão direta.....	101
Figura 32 -	Transmissão semi-direta.....	101
Figura 33 -	Transmissão indireta.....	102
Figura 34 -	Resultados de resistência á tração em função com o tempo de cura .....	106
Figura 35 -	Ganho de resistência à compressão em função do tempo de cura após a moldagem .....	108
Figura 36 -	Relação entre resistência à compressão e o teor de cimento nas seis misturas do CCR.....	109
Figura 37 -	Influência do teor de cimento na compressão diametral do CCR. ....	111
Figura 38 -	Relação da resistência á compressão e compressão diametral das misturas para tempo de cura de 90 dias. ....	111

Figura 39 -	Relação entre resistências à compressão simples e diametral. ....	112
Figura 40 -	Comportamento do módulo de elasticidade .....	113
Figura 41 -	Resultados da velocidade de pulso em função da resistência à compressão. ....	114
Figura 42 -	Resultados da compressão simples(figura A) e tensão desviatória(figura B) em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal.....	117
Figura 43 -	Resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e teor volumétrico da cal para 0% (Figura 43A), 12,5% (Figura 43B) e 25% (Figura 43C) de cinza volante.....	118
Figura 44 -	Resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e o teor volumétrico da cal para temperatura de cura de 40°C ..	120
Figura 45 -	Resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e o teor volumétrico da cal para temperatura de cura de 60°C ..	120
Figura 46 -	Resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e o teor volumétrico da cal para temperatura de cura de 80°C ..	121
Figura 47 -	Termelétrica Presidente Médici - CGTEE.....	123
Figura 48 -	Vista do silo de armazenamento da cinza volante da fase B.....	124
Figura 49 -	Coleta de amostras de Brita 0 e 1 no depósito da Empresa ENTEL. ....	124
Figura 50 -	Coleta de amostras da areia no depósito da Empresa ENTEL .....	125
Figura 51 -	Fluxograma dos ensaios nos materiais. ....	126
Figura 52 -	Fotos das cinzas volante e de fundo da Termelétrica Presidente Médici – fase B .....	129
Figura 53 -	Variação da viscosidade com a temperatura para materiais cristalinos e vítreos. ....	134
Figura 54 -	Diagrama bidimensional das estruturas cristalina e vítrea da sílica .....	135
Figura 55 -	Resultados do ensaio de difratometria e percentual de estrutura amorfa da cinza volante. ....	137
Figura 56 -	Resultados do ensaio de difratometria da cinza de fundo e percentual de estrutura amorfa da cinza de fundo.....	137
Figura 57 -	Distribuição granulométrica das cinzas volante e de fundo. ....	144
Figura 58 -	Curvas de compactação da cinza volante nas energias.....	146
Figura 59 -	Localização da origem da areia usada no CCR. ....	147
Figura 60 -	Curva da análise granulométrica por peneiramento da areia.....	148
Figura 61 -	Foto do agregado miúdo (areia) utilizado na pesquisa. ....	149

Figura 62 -	Curva da análise granulométrica por peneiramento das britas 0 e 1 .....	151
Figura 63 -	Foto do agregado graúdo (brita 0) utilizado na pesquisa.....	152
Figura 64 -	Foto do agregado graúdo (brita 1) utilizado na pesquisa.....	152
Figura 65 -	Fluxograma dos ensaios nos materiais. ....	155
Figura 66 -	Faixa de Pittman e distribuição granulométrica da mistura do $CCR_{\text{alternativo}}$ .....	157
Figura 67 -	Faixa de Pittman e distribuição granulométrica da mistura $CCR_{\text{alternativo}}$ , com cinza de fundo.....	158
Figura 68 -	Curvas de compactação das mistura de $CCR_{\text{alternativa}}$ , usando cinza volante nas quantidades de 20, 30, 40, 50 e 60% .....	159
Figura 69 -	Foto do compactador mecânico e o molde para C.P. de 200 x 100mm .....	160
Figura 70 -	Resultados de resistência à compressão da quantidade de cinza volante na mistura – cal hidratada fixada em 10%.....	161
Figura 71 -	Fluxograma dos ensaios CCR .....	162
Figura 72 -	Curvas de compactação e de graus de saturação do $CCR_{\text{convencional}}$ .....	163
Figura 73 -	Curvas de compactação nas três energias para $CCR_{4-50\% \text{ alternativa}}$ .....	165
Figura 74 -	Curvas de compactação das três energias de compactação e curva dos máximos. ....	166
Figura 75 -	Estrutura interna do CCR .....	167
Figura 76 -	Curvas de compactação e curvas do grau de saturação com cinza de fundo.....	169
Figura 77 -	Curvas de compactação das misturas $CCR_{4-50\% \text{ alternativa}}$ sem e com cinza de fundo(CF), nas três energias de compactação. ....	170
Figura 78 -	Câmara úmida com temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de 95% .....	171
Figura 79 -	Curva de compactação, na energia intermediária, com teores de cal 10% e 15% da mistura $CCR_{4-50\% \text{ alternativa}}$ .....	172
Figura 80 -	Equipamento para o ensaio de compressão simples.....	173
Figura 81 -	Resultados de compressão simples em função da porosidade.....	173
Figura 82 -	Resultados da resistência à compressão em função do teor volumétrico da cal.....	175
Figura 83 -	Correlação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal.....	176
Figura 84 -	Equipamento do ensaio de compressão diametral.....	177
Figura 85 -	Resultados da compressão diametral em função da porosidade ( $\eta$ ).....	178

Figura 86 -	Resultados da resistência à compressão diametral em função do teor volumétrico da cal .....	179
Figura 87 -	Correlação da resistência à compressão diametral em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal.....	180
Figura 88 -	Correlação da resistência à compressão simples e diametral em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal.....	181
Figura 89 -	Comportamento da resistência à compressão em função do teor volumétrico da cal com e sem cinza de fundo.....	183
Figura 90 -	Correlação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal da mistura CCR4-50% com e sem cinza de fundo.....	184
Figura 91 -	Correlações da resistência à compressão em função da relação da porosidade e $C_{iV}$ e $B_V$ .....	186
Figura 92 -	Resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e $C_{iV}$ e $L_V$ .....	187
Figura 93 -	Moldagem dos corpos de prova prismáticos .....	189
Figura 94 -	Foto A (repouso por 48 horas) e foto B (desmoldagem e suporte de madeira) .....	190
Figura 95 -	Correlação da resistência à tração na flexão em função da relação da porosidade e teor volumétrico da cal.....	191
Figura 96 -	Ensaio de resistência à tração por flexão em corpo de prova prismático .....	193
Figura 97 -	Correlações do módulo de elasticidade estático com a relação porosidade e teor volumétrico da cal.....	194
Figura 98 -	Fotos da sequência para determinação da onda P (Fig. A) e onda S (Fig.B) .....	196
Figura 99 -	Correlações do módulo de elasticidade dinâmico com a relação porosidade e teor volumétrico da cal.....	198
Figura 100 -	Resistência à compressão simples em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal e cinza volante ( $B_V$ ).....	200
Figura 101 -	Resistência à compressão simples em função da relação porosidade e $L_V$ e $B_V$ .....	201

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Faixas típicas de elementos químicos do Produto da Combustão do Carvão (PCC) para distintos tipos de carvão mineral. ....	33
Tabela 2 -	Produção e taxa de utilização anual de alguns países e regiões no ano de 2010 .....	34
Tabela 3 -	Produtos da combustão do carvão usados nos Estados Unidos – Ano 2015 (ACAA) .....	35
Tabela 4 -	Produção de cinzas do carvão de usinas para gerar vapor no seu processo industrial. ....	44
Tabela 5 -	Produção de cinzas do carvão das termelétricas brasileiras. ....	44
Tabela 6 -	Pesquisas desenvolvidas na CIENTEC aproveitando da cinza do carvão.....	52
Tabela 7 -	Concentração dos constituintes maiores e menores em cinzas volantes sul-brasileiras obtidas a partir da queima de carvão pulverizado em usinas termelétricas e unidades do segmento industrial. ....	55
Tabela 8 -	Composição química de materiais pozolânicos.....	60
Tabela 9 -	Análise qualitativa do material pozolânico quanto a sua estrutura amorfa e composição mineralógica cristalina .....	61
Tabela 10 -	Análise qualitativa do material pozolânico quanto a sua estrutura amorfa e composição mineralógica cristalina .....	61
Tabela 11 -	Resultados da superfície específica de materiais pozolânicos.....	62
Tabela 12 -	Tempos correspondentes para ensaio de consistência .....	73
Tabela 13 -	Propriedade mecânicas típica do CCR como base. ....	81
Tabela 14 -	Fatores que afetam as propriedades do CCR endurecido.....	81
Tabela 15 -	Módulo de elasticidade para concretos produzidos com agregados de diferentes natureza.....	92
Tabela 16 -	Resultados obtidos no ensaio de tração na flexão aos 28 dias. ....	98
Tabela 17 -	Normas para ensaios de propagação de ondas ultrasônicas. ....	103
Tabela 18 -	Proporção da mistura do CCR com alto volume de cinza.....	106
Tabela 19 -	Dosagem do CBR usando cinza volante.....	107
Tabela 20 -	Resultados de outros autores usando alto volume de cinza volante no CCR. ....	108
Tabela 21 -	Resultados de resistência à compressão simples e diametral. ....	110

Tabela 22 -	Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	113
Tabela 23 -	Resultados de velocidade ultrasonica. ....	114
Tabela 24 -	Caracterização química do cimento CPV-ARI.....	126
Tabela 25 -	Caracterização Física do Cimento CPV-ARI .....	127
Tabela 26 -	Exigências físicas. ....	128
Tabela 27 -	Resultados de análise química da cal hidratada. ....	128
Tabela 28 -	Resultados do ensaio de lixiviação das cinzas volantes. ....	131
Tabela 29 -	Resultados do ensaio de lixiviação de cinza fundo. ....	131
Tabela 30 -	Resultados do ensaio de solubilização da cinza volante. ....	132
Tabela 31 -	Resultados do ensaio de solubilização da cinza de fundo. ....	133
Tabela 32 -	Resultados da composição química da cinza volante.....	138
Tabela 33 -	Resultados da composição química da cinza de fundo.....	139
Tabela 34 -	Compostos hidratados possíveis de serem formados na atividade pozolânica da cinza volante com hidróxido de cálcio .....	142
Tabela 35 -	Exigências físicas da NBR 12653 (2012) e resultados da cinza volante.....	143
Tabela 36 -	Dados granulométricos percentuais das cinzas volante e de fundo.....	145
Tabela 37 -	Resultados dos parâmetros de compactação das energias normal, intermediária e modificada da cinza volante. ....	146
Tabela 38 -	Resultados da análise granulométrica por peneiramento da areia.....	148
Tabela 39 -	Resultados da apreciação petrográfica. ....	149
Tabela 40 -	Resultados das massas específicas e absorção da areia. ....	150
Tabela 41 -	Resultados da análise granulométrica por peneiramento da brita 0 .....	150
Tabela 42 -	Resultados da análise granulométrica por peneiramento da brita 0 .....	151
Tabela 43 -	Resultados de massa específica dos grãos e massa solta.....	153
Tabela 44 -	Resultados de massa específica aparente e absorção de água. ....	153
Tabela 45 -	Análise quantitativa das brita 0 e 1.....	154
Tabela 46 -	Resultados de ensaios na brita 0 e 1. ....	154
Tabela 47 -	Percentual, em massa, da brita 0, 1 e areia. ....	157
Tabela 48 -	Percentual, em massa, da brita 0, 1 e cinza de fundo. ....	157
Tabela 49 -	Parâmetros de compactação do CCR <sub>alternativo</sub> . ....	159
Tabela 50 -	Resultados de resistência à compressão das misturas do CCR <sub>alternativo</sub> .....	161
Tabela 51 -	Parâmetros de compactação do CCR <sub>convencional</sub> .....	164
Tabela 52 -	Resultados do percentual, em massa, dos materiais constituintes do CCR4-50% <sub>alternativo</sub> . ....	164



Tabela 53 -	Resultados dos parâmetros de compactação nas três energias de compactação para a mistura CCR4-50% <sub>alternativa</sub> .....	165
Tabela 54 -	Equação da curva dos máximos .....	166
Tabela 55 -	Resultados do percentual na mistura dos materiais constituintes do CCR4-50% <sub>alternativo</sub> , com cinza de fundo.....	168
Tabela 56 –	Resultados dos parâmetros de compactação da mistura CCR4-50% <sub>alternativo</sub> , com cinza de fundo .....	169
Tabela 57 –	Propriedades mecânicas típicas do CCR para camada de base .....	170
Tabela 58 –	Resultados de resistência à compressão para mistura CCR4-50% <sub>alternativa</sub> ...	175
Tabela 59 –	Resultados de resistência à compressão diametral para mistura CCR4-50% <sub>alternativa</sub> .....	179
Tabela 60 –	Consumo de cimento usado no CCR <sub>convencional</sub> .....	185
Tabela 61 –	Resultados do ensaio de compressão simples para o CCR <sub>alternativo</sub> .....	199

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ASTM:	American Society for Testing and Materials
$C_a$ :	teor de cal calculado em relação à massa cinza volante seca e expresso em porcentagem
$C_{av}$ :	teor volumétrico de cal, expresso em porcentagem do volume total
CCR :	Concreto Compactado com Rolo
CCR <sub>alternativo</sub> :	Concreto Alternativo Compactado com Rolo
CGTEE:	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica
CIENTEC:	Fundação de Ciência e Tecnologia – RS
$C_u$ :	coeficiente de uniformidade
EPA:	Environmental Protection Agency
$\eta$ :	porosidade
NBR:	Norma Brasileira
RCD:	resistência à compressão diametral
RCS:	resistência à compressão simples
$S_r$ :	grau de saturação
UFRGS:	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USACE:	United States Army Corps of Engineers
USBR:	United States Bureau of Reclamation
$\gamma_{d(máx.)}$ :	peso específico aparente seco máximo
$\gamma_d$ :	peso específico aparente seco
$\omega_{(ót.)}$ :	teor de umidade ótimo
$\omega$ :	teor de umidade

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA .....	23
1.2 PESQUISAS RELACIONADAS AO TEMA .....	25
1.3 ORIGINALIDADE .....	27
1.4 JUSTIFICATIVA.....	28
1.5 OBJETIVOS.....	28
1.5.1 Objetivos Gerais.....	28
1.5.2 Objetivos Específicos.....	29
1.6 ESTRUTURA DA TESE.....	30
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>31</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS DAS CINZAS DA COMBUSTÃO DO CARVÃO (CCC) MINERAL PULVERIZADO .....	31
2.2 PANORAMA DO USO DAS CINZAS NO MUNDO.....	33
2.3 PANORAMA DO USO DAS CINZAS NO BRASIL .....	41
2.4 ANÁLISE DO CARVÃO MINERAL NO SUL DO PAÍS.....	52
2.5 CARACTERÍSTICAS DAS CINZA DE CARVÃO PULVERIZADO NO BRASIL .....	54
2.5.1 Características químicas.....	54
2.5.2 Características físicas .....	55
2.6 FATORES QUE INFLUENCIAM A CINZA DA COMBUSTÃO DE CARVÃO PULVERIZADO EM SISTEMAS POZOLÂNICOS .....	58
2.6.1 Morfologia dos grãos de cinza volante .....	59
2.6.2 Composição química, mineralógica e estrutura amorfa da cinza volante .....	60
2.6.3 Tamanho das partículas e superfície específica .....	61
2.7 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR) .....	64
2.7.1 Definição .....	64

2.7.2 Vantagens e desvantagens do Concreto Compactado com Rolo-CCR.....	67
2.7.3 Metodologia de dosagem do CCR .....	69
2.7.3.1 Peso específico aparente seco e teor ótimo de compactação.....	70
2.7.3.2 Trabalhabilidade .....	72
2.7.4 Materiais .....	74
2.7.4.1 Agregados.....	75
2.7.4.2 Cimento .....	78
2.7.4.3 Água .....	79
2.7.4.4 Aditivos .....	79
2.7.5 Propriedades do CCR endurecido .....	80
2.7.5.1 Resistência à compressão simples .....	81
2.7.5.2 Resistência à tração .....	82
2.7.5.2.1 Ensaio de tração direta ou ensaio de tração axial .....	83
2.7.5.2.2 Ensaio de compressão diametral.....	83
2.7.5.2.3 Resistência à tração na flexão.....	84
2.7.5.3 Módulo de elasticidade estático.....	89
2.7.5.4 Módulo de elasticidade dinâmico .....	99
2.7.5.4.1 Módulo de elasticidade dinâmico a partir do ensaio estimulado por impulso.....	99
2.7.5.4.2 Módulo de elasticidade a partir do ensaio de determinação da velocidade de onda ultrassônica .....	100
2.7.6 Influências na adição de materiais pozolânicos no Concreto Compactado com Rolo (CCR) .....	103
2.7.7 Método racional no uso de cimento e cal hidratada em materiais compactados .....	116
<b>3 METODOLOGIA DA PESQUISA .....</b>	<b>122</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	122
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	125
3.2.1 Cimento .....	126
3.2.2 Cal hidratada .....	127
3.2.3 Caracterização das cinzas volante (fly ash) e de fundo (bottom ash).....	128
3.2.3.1 Resultados de classificação de resíduos .....	129

3.2.3.2 Ensaio de Difratometria.....	134
3.2.3.3 Composição química (fluorescência de raio X) .....	138
3.2.3.4 Superfície específica BLAINE e BET.....	139
3.2.3.5 Atividade pozolânica .....	140
3.2.3.6 Análise granulométrica.....	143
3.2.3.7 Compactação nas energias norma, intermediária e modificada da cinza volante .....	145
<b>3.2.4 Agregados.....</b>	<b>146</b>
3.2.4.1 Características do agregado miúdo.....	147
3.2.4.1.1 Análise granulométrica.....	147
3.2.4.1.2 Apreciação petrográfica macroscópica de areia .....	149
3.2.4.1.3 Peso específico, peso unitário e absorção de água .....	150
3.2.4.2 Características do agregado graúdo.....	150
3.2.4.2.1 Análise granulométrica.....	150
3.2.4.3 Apreciação petrográfica macroscópica brita 0 e 1.....	152
3.2.4.4 Peso específico dos grãos, peso específico solta, peso específico aparente e absorção de água.....	153
3.2.4.5 Sanidade .....	153
3.2.4.6 Desgaste Los Angeles e índice de forma.....	154
<b>3.3 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CINZA VOLANTE NA MISTURA DO CCR<sub>ALTERNATIVO</sub>.....</b>	<b>155</b>
3.3.1 Definição da composição Granulométrica para o CCR.....	155
3.3.2 Determinação dos parâmetros de compactação da cinza volante para o CCR <sub>alternativo</sub> .....	158
3.3.3 Determinação da quantidade de cinza volante para a mistura do CCR <sub>alternativo</sub> .....	159
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>162</b>
4.1 RESULTADOS DA COMPACTAÇÃO PARA A MISTURA DO CCR CONVENCIONAL.....	163
4.2 RESULTADOS DAS ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO PARA A MISTURA CCR4-50% <sub>ALTERNATIVA</sub> .....	164

4.3 RESULTADOS DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA DOSAGEM DO CCR4-50% ALTERNATIVO, SUBSTITUINDO AREIA POR CINZA DE FUNDO.....	167
4.4 RESULTADOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E DIAMETRAL DA MISTURA CCR4-50% ALTERNATIVO.....	170
4.4.1 Efeitos da variação da Porosidade e Teor de cal Hidratada nos Resultados da Resistência à Compressão simples da mistura CCR4-50% alternativa.....	172
4.4.2 Efeito da relação porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico da cal ( $L_v$ ) na resistência à compressão simples da mistura CCR4-50% alternativo.....	176
4.4.3 Efeitos da variação da Porosidade e Teor de cal Hidratada nos Resultados da Resistência à Compressão Diametral da mistura CCR4-50% alternativa.....	177
4.4.4 Efeito da relação porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico da cal ( $L_v$ ) na resistência à compressão diametral da mistura CCR4-50% alternativo.....	180
4.4.5 Efeitos da variação do teor volumétrico da cal Hidratada nos Resultados da Resistência à Compressão simples da mistura CCR4-50% alternativa, com cinza de fundo.....	182
4.4.6 Efeito da relação porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico da cal ( $L_v$ ) na resistência à compressão diametral da mistura CCR4-50% alternativo, com e sem uso da cinza de fundo.....	183
4.5 RESULTADOS DE COMPRESSÃO SIMPLES DO CCR CONVENCIONAL.....	184
4.6 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE( $\eta$ ) E TEOR VOLUMÉTRICO DA CAL( $L_v$ ) NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DA MISTURA CCR4-50% ALTERNATIVO.....	188
4.7 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE ( $\eta$ ) E TEOR VOLUMÉTRICO DA CAL ( $L_v$ ) NO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DA MISTURA CCR4-50% ALTERNATIVO.....	192

4.8 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE ( $\eta$ ) E TEOR VOLUMÉTRICO DA CAL ( $L_v$ ) NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DA MISTURA CCR4-50% <sub>ALTERNATIVO</sub> .....	195
4.9 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE ( $\eta$ ) E TEOR VOLUMÉTRICO DA CAL E CINZA VOLANTE ( $B_v$ ) NA RESISTÊNCIA DA COMPRESSÃO SIMPLES .....	199
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>202</b>
5.1 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO VARIANDO A QUANTIDADE DE CINZA VOLANTE.....	202
5.2 RESULTADOS DAS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E DIAMETRAL PARA A MISTURA DE 50% DE CINZA VOLANTE, CCR4-50% <sub>ALTERNATIVO</sub> .....	203
5.3 RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA DE 50% DE CINZA VOLANTE, CCR4-50% <sub>ALTERNATIVO</sub> , COM E SEM CINZA DE FUNDO.....	205
5.4 RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SIMPLES DO CCR <sub>CONVENCIONAL</sub> COMPARADO COM O CCR <sub>ALTERNATIVO</sub> .....	206
5.5 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA A MISTURA CCR4-50% <sub>ALTERNATIVA</sub> .....	207
5.6 RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO PARA A MISTURA CCR4-50% <sub>ALTERNATIVA</sub> .....	208
5.7 SUGESTÕES .....	209
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>211</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

A falta de material natural para uso na construção civil, faz com que as universidades e institutos de pesquisas busquem alternativas, que podem ser resíduos sólidos inorgânicos, gerados de processos industriais, que apresentem uma boa qualidade técnica e sejam economicamente e ambientalmente viáveis.

Os estados da Região Sul do Brasil apresentam imensas reservas carboníferas, fazendo o carvão fóssil o principal combustível em termelétricas na geração de energia. Da queima do carvão resultam dois subprodutos: cinza volante (*fly ash*) e de fundo (*bottom ash*). A cinza volante que é gerada, nas termelétricas, menos que 30% é aproveitada para fabricação de cimento pozolânico (CP-IV), segundo informações das termelétricas Presidente Médice-CGTEE, TRACTEBEL e as usinas que utilizam a queima do carvão mineral para seus processos industriais, BRASKEM e Celulose Rio Grandence e vendem esta cinza para as cimenteiras, enquanto a cinza de fundo não tem emprego e junto com o restante da volante, voltam para as minas de carvão ou vão sendo depositadas em grandes bacias de sedimentação, que necessitam de quantidades consideráveis de áreas e materiais para suas construções, estes subprodutos são um exemplo de resíduos sólidos inorgânicos.

A produção de cinzas geradas da combustão do carvão nos estados do sul do Brasil, atingem hoje, em média, 4.000.000 toneladas/ano, considerando o pico máximo de energia, segundo informações das termelétricas Presidente Médice-CGTEE, TRACTEBEL e as usinas que utilizam a queima do carvão mineral para seus processos industriais, BRASKEM e Celulose Riograndence. Estas quantidades tendem a aumentar em função da entrada de novas unidades termelétricas a serem instaladas, uma delas é a Termelétrica Pampa Sul da ENGIE TRACTEBEL ENERGIA, que está sendo instalada em SEIVAL, região que faz parte do município de Candiota-RS, previsão de início é para 2019 e já em funcionamento as



termelétricas de ITAQUI, localizada em São Luiz (Maranhão) e PECÉM, localizada no estado do Ceará.

Diante deste cenário, há um excedente que tende a crescer e, além do mais, há sérios problemas de critérios de logística de armazenamento, pois estes materiais são muitas vezes misturados com materiais existentes no local, tornando-se muito heterogêneo, de baixa qualidade, inviabilizando seu uso futuro para várias aplicações na construção civil.

Além disto, os crescentes custos associados com a disposição destas cinzas tendem a reduzir a atratividade do carvão mineral, como fonte de energia, pelo custo real. As cinzas, se por um lado, podem ser uma ameaça ao meio ambiente, por outro, representam um importante recurso mineral produzido no Estado tendo em vista:

- a) as extraordinárias propriedades físico-químicas e mineralógicas, pouco encontradas em outros materiais, caracterizadas por uma alta capacidade de reação com aglomerantes do tipo cal;
- b) as cinzas, na prática das construções, quando empregadas na forma estabilizada com cal, além de produzirem peças rígidas passam a ter seus elementos tóxicos imobilizados e praticamente nulas as liberações de metais pesados;
- c) as cinzas podem ser utilizadas na forma pura (sem aglomerantes), sozinhas ou incorporadas como material inerte em cerâmicas, concretos, etc.;
- d) pronta disponibilidade para o uso após a sua formação, não necessitando a intervenção de processos intermediários de beneficiamento a não ser eventuais secagens quando em presença de excesso de umidade;
- e) é um dos recursos minerais mais produzidos no Rio Grande do Sul.

Mas, por mais que se apresentem com estas características de propriedades pozolânicas as cinzas geradas das termelétricas brasileiras, tem seu uso apenas nas empresas fabricantes de cimento, não há regulamentações, normas ou leis, para seu descarte e uso no país.

O trabalho publicado na World of Coal Ash (WOCA) Conference do ano de 2013, fala sobre estas regulamentações e normas, sobre o descarte e uso das cinzas de carvão geradas das termelétricas de alguns países.

Numa avaliação técnica e econômica, para uso dos resíduos do carvão mineral, segue :

- a) aprofundar os estudos técnicos e econômicos relativos a secagem e moagem de cinza úmidas, bem como os diversos aspectos logísticos (transporte e distribuição) do produto fina, no sentido de fundamentar uma política de preços combatíveis com a colocação do produto no Estado e em outras regiões do Brasil;
- b) procurar assessorar a indústria cimenteira e as autoridades locais na formulação e aprovação de uma legislação que regule a produção de novos cimentos usando como matéria prima principal as cinzas do carvão mineral;
- c) estabelecer convênios com os Departamentos Estaduais e Federais Rodoviários, no sentido de constar, nas licitações dos projetos executivos de rodovias, a alternativa de uso das cinzas do carvão mineral, nos estados onde encontram-se as termelétricas à carvão;
- d) fomentar projetos de pesquisas, para novos produtos, com o uso de cinzas do carvão mineral, através de convênios de institutos de pesquisas e Universidades Federais, na busca de recursos financeiros junto aos órgãos de fomento a pesquisas e Empresas ligadas a ANEEL;
- e) estabelecer convênios com o Ministério do meio ambiente e dos Transportes e outros, no sentido de viabilizar uma ampla divulgação das possibilidades técnicas de uso das cinzas do carvão mineral e das suas vantagens econômicas e ambientais.

## 1.2 PESQUISAS RELACIONADAS AO TEMA

São muitas as possibilidades de uso para os resíduos da combustão de carvão em setores industriais que utilizam baixas e médias tecnologias, segundo Clarke (1992) no mundo há

mais de 200 formas de utilização. Os usos possíveis de serem praticados ainda são maiores se consideradas também as alternativas que adotam altas tecnologias, correntemente direcionadas para extração de minerais de valor ou para frações especiais das cinzas.

Uma das utilizações mais extensivas e difundidas em todo mundo é em cimentos e concretos de cimento Portland, sendo as aplicações mais desejáveis e simples para os resíduos de carvão. Apesar dos esforços das instituições de pesquisas e universidade federais dedicadas ao tema, há uma deficiência da disseminação do efetivo conhecimento para empresas públicas e privadas. Não obstante as aplicações já desenvolvidas no Brasil, novas investigações que buscam áreas emergentes como concretos celulares, agregados leves, blocos de cinza-cal, argamassas pozolânicas, cerâmicas, devem ser incentivadas.

Assim sendo, podemos destacar as seguintes pesquisas internacionais:

As pesquisas a seguir expostas, apresentam resultados do comportamento das propriedades mecânicas do Concreto Compactado com Rolo (CCR) com alto volume de cinza do carvão, bem como os efeitos da reação pozolânica para várias aplicações na construção civil e o método de previsão das propriedades mecânicas desenvolvida por Consoli et al. (2007, 2011, 2017). Assim sendo, destaque deve ser dado para as seguintes pesquisas :

Atis (2004) utilizou alto volume de cinza volante no CCR, para verificar as propriedades de resistência, a consistência do concreto e a sua influência no tempo de cura;

Cheng Cao (1999) estudou o efeito de alto volume de cinza realizando uma análise da resistência e a sua taxa de crescimento;

Sahu (2014) utilizou a cinza volante como material alternativo para base e sub-base de pavimento, adicionando, cimento, cal hidratada, entre outros materiais. Este trabalho apresenta uma revisão da literatura do uso da cinza volante, mostrando seus benefícios quanto ao meio ambiente. A revisão mostra que o uso da cinza faz aumentar a resistência e melhora a durabilidade.

No Brasil podemos destacar as seguintes pesquisas :

Da Silva (2006) usou a cinza de fundo, como agregado miúdo, em substituição a areia, no Concreto Compactado com Rolo (CCR);

Consoli et al. (2007) mostrou que ao estabilizar um solo com cimento, na avaliação da resistência deste material estabilizado é importante conhecer a relação porosidade da mistura em relação ao teor volumétrico do cimento ( $\eta/C_{iv}$ ). Os parâmetros verificados foram teor de cimento, porosidade e relação porosidade/cimento. Modelos comportamentais e um método racional foram estabelecidos, onde a relação porosidade/cimento é fundamental para a avaliação da resistência não confinada de solos artificialmente cimentados.

Consoli et al. (2011) introduziram uma metodologia de dosagem para estabilização de solos tratados com cinza volante e cal, para aplicação em base de pavimentos, como suporte de camadas para fundação superficial, etc., através de um critério racional como existe na tecnologia do concreto, em que se prevê uma determinada resistência baseada na relação água/cimento. Neste trabalho verificaram que a relação porosidade da mistura e o teor volumétrico de cal ( $\eta/L_v$ ) é fundamental para a previsão da resistência do solo estabilizado. Os parâmetros analisados foram: quantidade de cinza, quantidade de cal, porosidade da mistura compactada e proporção de porosidade/teor volumétrico de cal. No final para previsão da resistência à compressão verificou-se um bom ajuste de uma função de potência com um expoente 0,12, no teor volumétrico da cal, isso é, a previsão da resistência é função do índice  $\frac{\eta}{(L_v)^{0,12}}$ .

### 1.3 ORIGINALIDADE

Neste trabalho, de uma forma original, são mostrados o desenvolvimento de uma dosagem racional para obter, como resultados, qual a melhor proporção da cinza volante e cal hidratada e qual a melhor relação entre estes dois produtos, baseados nos resultados de compactação e compressão simples do concreto compactado com rolo (CCR).

Na maioria dos trabalhos verificados em alguns países (Estados Unido, Índia, Comunidade Europeia), a cinza volante é adicionada ao cimento Portland para aplicação no concreto compactado com rolo (CCR), a originalidade está na substituição de 100% do cimento Portland pela mistura de cinza volante com cal hidratada.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

A iniciativa para a apresentação deste trabalho, como tese de doutorado, iniciou com uma atuação integrada entre a Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE), que é a financiadora deste projeto e o Departamento de Geotecnia (DEPGEO) da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIEN TEC) do Rio Grande do Sul, com longa experiência na pesquisa de cinzas de carvão para diversos fins. Sendo que, se buscou desenvolver, junto ao maior polo gerador de cinzas do Rio Grande do Sul, o uso de cinzas volante e de fundo como materiais alternativos no concreto compactado com rolo (CCR), para uso nas camadas de base e sub-base de pavimentos.

O presente projeto, portanto, representa a combinação dos interesses e competências de grupos de pesquisadores atuantes em diferentes instituições, incluindo o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que buscam unir esforços e recursos disponíveis para o desenvolvimento de um tema de importância para o estado do Rio Grande do Sul e que pode ter repercussões positivas para outros estados do nosso país, no uso de materiais alternativos, que são resíduos dos processos industriais.

Trata-se de um trabalho que envolve temas bastante atuais no nosso estado e que se apresenta como uma grande inovação, na medida que propõe o desenvolvimento de um novo PRODUTO para ser utilizado na construção civil, ou seja, a utilização de um Concreto Alternativo Compactado com Rolo (CCR<sub>alternativo</sub>), com alto teor de cinza volante.

O uso das cinzas de carvão em pavimento, terá como consequências benefícios ambientais, devido a preservação dos recursos naturais e uso de resíduos que descartados podem vir a poluir o meio ambiente, e benefícios econômicos, uma vez que as regiões próximas às termelétricas poderão utilizá-las como materiais de construção para a pavimentação de estradas vicinais e vias urbanas.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 Objetivos Gerais

O presente projeto tem como objetivos gerais:

- a) desenvolvimento de um novo produto, para ser aplicado na estrutura de pavimentos, como camadas de base e sub-base, utilizando como matérias-primas as cinzas volantes e de fundo, geradas na termelétrica Presidente Médici no Município de Candiota – RS;
- b) redução do descarte de cinzas resultantes da combustão do carvão mineral, no meio ambiente, através do uso, como materiais de construção, tanto sob o ponto de vista ambiental quanto da ocupação do espaço físico, além de constituir um grande desperdício de matérias-primas;
- c) preservação de recursos naturais pela sua substituição por resíduos da queima de carvão;
- d) formação de recursos humanos para atuar em atividades tecnológicas voltadas ao uso de resíduos da combustão do carvão como materiais de construção.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do projeto são:

- a) determinar a dosagem na proporção **cinza volante:cal hidratada**, em substituição de 100% de cimento Portland, que possa dar uma boa resposta nas propriedades mecânicas para aplicação em pavimento nas camadas de base e subbase;
- b) analisar as influências das variações da energia de compactação(normal, intermediária e modificada), do teor de cal (5%, 10%, 15%), para um tempo e temperatura de cura de 30 dias e  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , nas propriedades mecânicas do CCR (compressão simples, compressão diametral, módulo de elasticidade estático e dinâmico);
- c) por fim, determinar um modelo matemático, variando a energia de compactação(normal, intermediária e modificada) e teor de cal(5%, 10%, 15%) para um tempo e temperatura de cura de 30 dias e  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  das amostras, analisando as propriedades mecânicas do CCR(compressão simples, compressão diametral, módulo de elasticidade estático e dinâmico) em função da relação da porosidade( $\eta$ ) e teor volumétrico da cal( $L_v$ ).

## 1.6 ESTRUTURA DA TESE

Esta pesquisa é estruturada em cinco capítulos (considerando o presente capítulo - Introdução). Os temas dos demais capítulos estão sintetizados a seguir:

**Capítulo 2:** Neste capítulo, faz-se uma revisão bibliográfica, com a finalidade de fortalecer subsídios para as análises dos resultados de ensaios. Primeiramente são apresentadas as características das cinzas de termelétricas do tipo **carvão pulverizado**, segue-se o uso das cinzas de carvão no mundo e no Brasil e por último os fatores que influenciam no sistema pozolânico. Como a aplicação é no concreto compactado com rolo (CCR), são apresentadas algumas definições, suas vantagens e desvantagens, quais os parâmetros que influenciam nas propriedades mecânicas (compressão simples, diametral, módulo de elasticidade estático e dinâmico) do concreto endurecido e por último são apresentados resultados de trabalhos que incluem grandes volumes de cinza volante e sua influência nas propriedades mecânicas.

**Capítulo 3:** São descritas as metodologias adotadas para o desenvolvimento desta pesquisa. Estão apresentados a programação dos ensaios de caracterização física (análise granulométrica, compactação), química (fluorescência de Raio X, análise química elementar), mineralógica (difratometria) e mecânica (compressões simples e diametral, resistência a tração na flexão, ultrassom - PUNDIT e fadiga), bem como suas descrições e os parâmetros que influenciam nestes resultados de ensaios.

**Capítulo 4:** Resultados e análises dos resultados dos ensaios descritos no Capítulo 3. Estão apresentados os resultados de caracterização física dos materiais envolvidos nas misturas, as análises químicas das cinzas volante e de fundo e da cal hidratada, os minerais constituintes dos dois tipos de cinzas, bem como a quantidade, em percentagem, de estrutura amorfa e resultados de compressões simples e diametral, módulos de elasticidade estático e dinâmico.

**Capítulo 5:** Considerações finais das análises dos resultados do Capítulo 4, bem como as sugestões para futuras pesquisas de continuidade deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DAS CINZAS DA COMBUSTÃO DO CARVÃO (CCC) MINERAL PULVERIZADO

A queima de carvão mineral pulverizado para a geração de energia, entre 1200°C e 1600°C, em ambiente oxidante, com o tempo de permanência das partículas do carvão em chama, em torno de 2 segundos, conduz a uma fusão total ou parcial da matéria mineral (SILVA et al., 1999). Como produtos resultantes da combustão do carvão mineral têm-se a cinza de fundo e a volante, ambas formadas na câmara de combustão das caldeiras.

A cinza volante (fly ash) é o resíduo sólido, finamente dividido, arrastado pelo fluxo dos gases da combustão e coletado nos precipitadores eletrostáticos. O seu percentual de massa gerada depende do tipo de carvão que está sendo queimado.

A cinza de fundo (bottom ash) é o resíduo de textura mais grosseira que cai no fundo da fornalha em tanques de resfriamento, sendo removido hidráulicamente, por fluxo de água, sendo que seu percentual gerado depende do tipo de carvão queimado.

As características químicas e físicas das cinzas e a quantidade de cinzas geradas nas termelétricas dependem muito do tipo de carvão que está sendo usada nas termelétricas,

Como mostra a Figura 1, a seguir, 53% das reservas mundiais de carvão mineral são compostas por carvão com alto teor de carbono (hulha) e 47% com baixo teor de carbono (ATLAS ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL-ANEEL, 2008). A produção e o consumo mundial concentram-se nas categorias intermediárias: os carvões tipos betuminoso/sub-betuminoso e linhito. O primeiro, de maior valor térmico (hulha), é comercializado no mercado internacional. O segundo é utilizado na geração termelétrica local.



As reservas brasileiras são compostas pelo carvão dos tipos linhito e sub-betuminoso. As maiores jazidas situam-se nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. As menores, no Paraná e São Paulo. As reservas brasileiras ocupam o 10º lugar no ranking mundial, mas totalizam 7 bilhões de toneladas, correspondendo a menos de 1% das reservas mundiais totais.

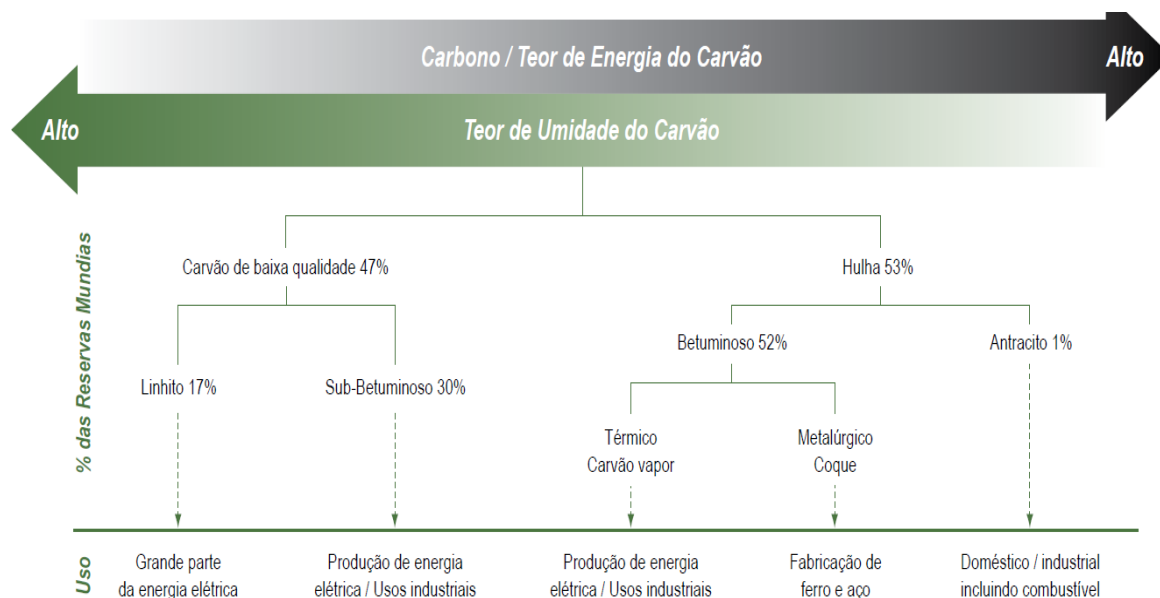


Figura 1 - Tipos de carvão, reservas e usos.

Fonte: Associação Brasileira do Carvão Mineral

Do volume de reservas, o Rio Grande do Sul responde por 89,25%; Santa Catarina, 10,41%; Paraná, 0,32% e São Paulo, 0,02%. Somente a Jazida de Candiota (RS) possui 38% de todo o carvão nacional. Mas o minério é pobre do ponto de vista energético e não admite beneficiamento nem transporte, em função do elevado teor de impurezas. Isto faz com que sua utilização seja feita sem beneficiamento e na boca da mina (ATLAS ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL-ANEEL, 2008). As termelétricas no sul do Brasil usam carvão do tipo sub-betuminoso, sendo que na queima são geradas, aproximadamente, 80% de cinza volante e 20% de cinza de fundo.

Na queima do carvão pulverizado na fornalha das caldeiras, a ignição das partículas do carvão ocorre rapidamente e o contato entre elas é pequeno e insuficiente, na maioria das vezes, para promover condições de equilíbrio da reação. Nessa situação, cada partícula apresentará comportamento e características diferentes quanto a viscosidade, ponto de fusão e conteúdo químico de sólidos e gases, resultando em partículas de cinza com características químicas, físicas, mineralógicas e microestruturais distintas (KHIRARA, 1986).

A obtenção de alta temperatura de combustão, dependente das condições de injeção de ar nos maçaricos e da finura e umidade do carvão, facilita a fusão e a homogeneização química das partículas (KHIRARA, 1986).

Portanto, a avaliação da eficácia da queima do carvão é importante para a definição da qualidade da cinza resultante, haja vista que uma queima inadequada resulta em teor elevado de carbono e em heterogeneidade das características físico-químicas das partículas desta.

Na Tabela 1 são apresentados alguns elementos químicos das cinzas geradas da queimas de alguns tipos de carvão mineral (HEIDRICH; FEUERBORN; WEIR, 2013). O termo Produto da Combustão do Carvão (PCC) serve para diversos tipos de cinzas (cinzas volante, de fundo, escória, cinza da combustão de leito fluidizado, resíduo da combustão da dessulfurização).

Tabela 1 - Faixas típicas de elementos químicos do Produto da Combustão do Carvão (PCC) para distintos tipos de carvão mineral.

Elemento	Betuminoso (%)	Sub-betuminoso (%)	Linhito (%)
SiO	20-60	40-60	16-45
AlO	5-35	20-30	10-25
FeO	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO	0-4	0-2	0-15
Não	0-4	0-2	0-6
KO	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-6

Fonte: Heidrich, Feuerborn e Weir (2013)

## 2.2 PANORAMA DO USO DAS CINZAS NO MUNDO

A produção de resíduos da queima de carvão fóssil é uma consequência inevitável da utilização deste recurso natural como combustível. A importância, portanto, do desenvolvimento de produtos e técnicas que busquem o aproveitamento destes resíduos, está intimamente ligada a difusão do emprego do carvão como combustível que é o mais abundante recurso natural energético do nosso planeta.

Dentro do contexto energético mundial atual, o carvão é visto como de importância capital. As previsões constantes em diversos relatórios, elaborados por instituições, grupos e organizações internacionais, preocupados com a produção de energia, são unânimes no

sentido de que nas próximas duas décadas haverá um aumento, a nível mundial, do uso de carvão mineral. É apontado como a mais eminente alternativa para o petróleo, pois tem maiores possibilidades de produzir resultados positivos a curto prazo.

Em 2010, em todo mundo, a geração dos Produtos da Combustão do Carvão (PCC) foi de aproximadamente de 780 milhões de toneladas, como podemos observar na Tabela 2. A China produziu 395 milhões de toneladas, os Estados Unidos 118 milhões de toneladas e a Índia 105 milhões de toneladas, são os países que mais geram produtos da combustão do carvão (HEIDRICH; FEUERBORN; WEIR, 2013).

Tabela 2 - Produção e taxa de utilização anual de alguns países e regiões no ano de 2010

PAÍS/REGIÃO	PRODUÇÃO DE PCC (t/ano)x10 <sup>6</sup>	USO DOS PCC (t/ano)x10 <sup>6</sup>	TAXA DE USO (%)
AUSTRÁLIA	13,1	6,0	45,8
CANADÁ	6,8	2,3	33,8
CHINA	395,0	265,0	67,1
EUROPA	52,6	47,8	90,9
ÍNDIA	105,0	14,5	13,8
JAPÃO	11,1	10,7	96,4
ORIENTE MÉDIO E ÁFRICA	32,2	3,4	10,6
ESTADOS UNIDOS	118,0	49,7	42,1
ÁSIA	16,7	11,1	66,5
RÚSSIA	26,6	5,0	18,8
<b>TOTAL</b>	<b>777,1</b>	<b>415,5</b>	<b>53,5</b>

Fonte: Heidrich, Feuerborn e Weir (2013)

Na Tabela 2 verifica-se que aproximadamente 53% dos 708 milhões de toneladas de PCC geradas nestes países foram registrados como utilizados para um determinado fim. O Japão tem a mais alta taxa de utilidade que é de 96,4% e o oriente médio junto com o restante do continente africano, configura a menor taxa de utilização que é de 10,5%. Em ordem decrescente quanto a taxa de utilização podemos observar o Japão com 96,4%, seguido da Europa com 90,9%, China com 67%, outros países da Ásia 66% e Estados Unidos com 42% (HEIDRICH; FEUERBORN; WEIR, 2013).

.Tabela 3 – Produtos da combustão do carvão usados nos Estados Unidos.

TIPOS DE CINZA	CV	CF	EC	FGD	FBC	PRODUÇÃO/US
<b>TOTAL DE PCCs</b>	<b>44.365.587</b>	<b>12.010.425</b>	<b>2.228.205</b>	<b>45.493.757</b>	<b>13.191.460</b>	<b>117.289.432</b>
<b>TOTAL DE PCCs</b>	<b>24.062.786</b>	<b>4.819.205</b>	<b>1.866.912</b>	<b>18.581.162</b>	<b>11.723.843</b>	<b>61.053.908</b>
CONCRETO (t)	15.737.238	570.092	33.290	409.134		<b>16.749.754</b>
CIMENTO (t)	3.629.151	1.130.802		1.649.934		<b>6.409.887</b>
FLOWABLE FILL (t)	107.263	9.106				<b>116.369</b>
ATERRO ESTRUTURAL (t)	1.277.356	1.561.531	305.770	1.322.805		<b>4.467.462</b>
BASE E SUB-BASE DE RODOVIAS (t)	178.281	311.779	21			<b>490.081</b>
ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS (t)	218.483	66.253		8.053		<b>290.789</b>
MISTURA ASFÁLTICA – CONTROLE DE NEVE E GELO (t)	52.784		14.176	11.479		<b>78.440</b>
JATEAMENTO DE AREIA (t)		527.695	77.935			<b>605.630</b>
APLICAÇÃO EM PAINÉIS DE GESSO (t)		184.712	1.400.455	173		<b>1.585.340</b>
ESTABILIZAÇÃO DE REJEITOS (t)	1.128.682	73.416		1.023.254	11.593.760	<b>13.819.113</b>
AGRICULTURA (t)		28.378		12.295.801		<b>12.234.178</b>
AGREGADOS (t)	1.138.078	242		9.218	130.083	<b>1.277.621</b>
SERVIÇOS DE CAMPO – GÁS (t)	2.409	1.788		1.567.406		<b>1.571.602</b>
OUTROS (t)		173.472				<b>173.472</b>
TAXA DE USO DOS PCCs (%)	181.907			36.875		<b>218.782</b>
	413.152	179.940	32.265	247.030		<b>875.387</b>
	<b>54,24</b>	<b>40,13</b>	<b>83,79</b>	<b>40,84</b>	<b>88,87</b>	<b>52,05</b>

Fonte: American Coal Ash Association (ACAA) (2015).

Nos Estados Unidos, na Tabela 3, são apresentadas as quantidades de produtos da combustão do carvão (PCC), bem como o quantitativo reciclado e suas aplicações. Segundo a American Coal Ash Association (ACAA), 2015, os produtos de combustão de carvão (PCCs) são os materiais produzidos quando queimamos carvão para gerar eletricidade. Eles incluem cinzas volantes, cinzas de fundo, escória de caldeira, gesso da dessulfuração de gases de combustão e outros subprodutos da usina. O termo "produto" foi inventado pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA para promover a reciclagem desses e outros subprodutos industriais

Os PCCs, na Europa, são utilizados principalmente na indústria de materiais de construção, na engenharia civil, na construção rodoviária, para trabalhos de construção na mineração subterrânea de carvão, bem como para fins de restauração e restauração em minas abertas. Em 2008, foram gerados 56 milhões de toneladas de PCCs, e cerca de 54% são utilizadas na indústria da construção, em engenharia civil e como materiais de construção em mineração subterrânea, cerca de 37% para restauração de minas, pedreiras, 2,4% foram armazenados temporariamente para utilização futura e 7,1% foram descartados, Figura 2, (HEIDRICH; FEUERBORN; WEIR, 2013).

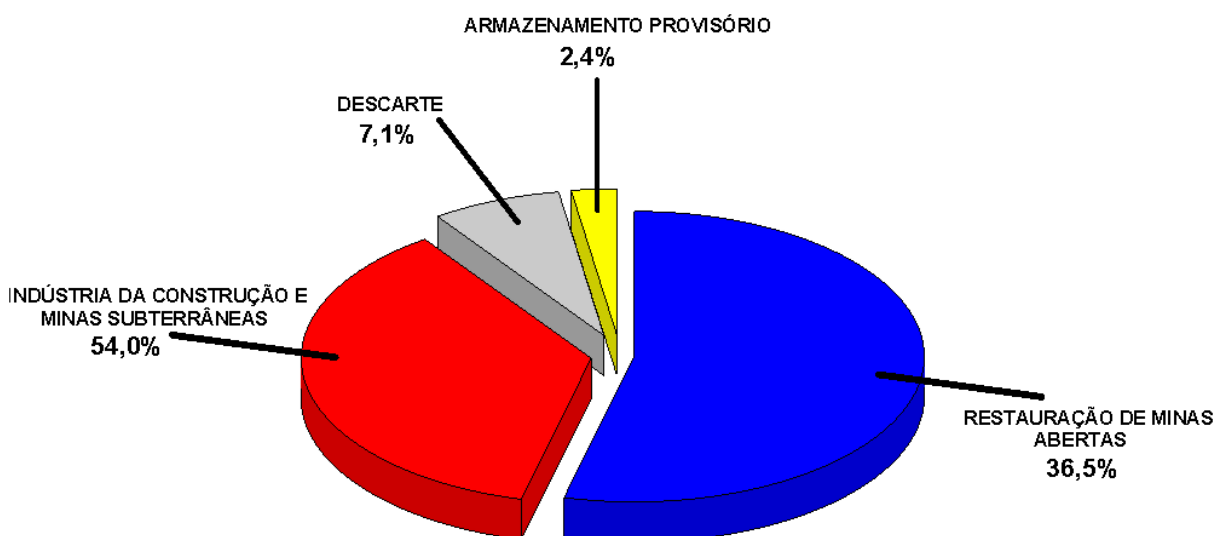


Figura 2 - Uso e descarte dos produtos da combustão do carvão na Europa em 2008.

Fonte: Heidrich, Feuerborn e Weir (2013)

Os produtos das cinzas do carvão, gerados na Europa são os seguintes:

### **Cinza volante (Fly Ash)**

Em 2008, aproximadamente 18 milhões de toneladas de cinza volante (fly ash) utilizadas na Indústria da construção e para em minas subterrâneas. Muitas das cinzas volantes foram usadas no concreto, em rodovias e como matéria prima para o cimento na produção do clínquer. A cinza volante é a mais importante dos PCCs com aproximadamente 68% da quantidade total gerada de cinza volante o principal uso é para matéria prima do cimento (32%). Na Figura 3 dão apresentados os principais usos da cinza volante na Europa (HEIDRICH; FEUERBORN; WEIR, 2013).

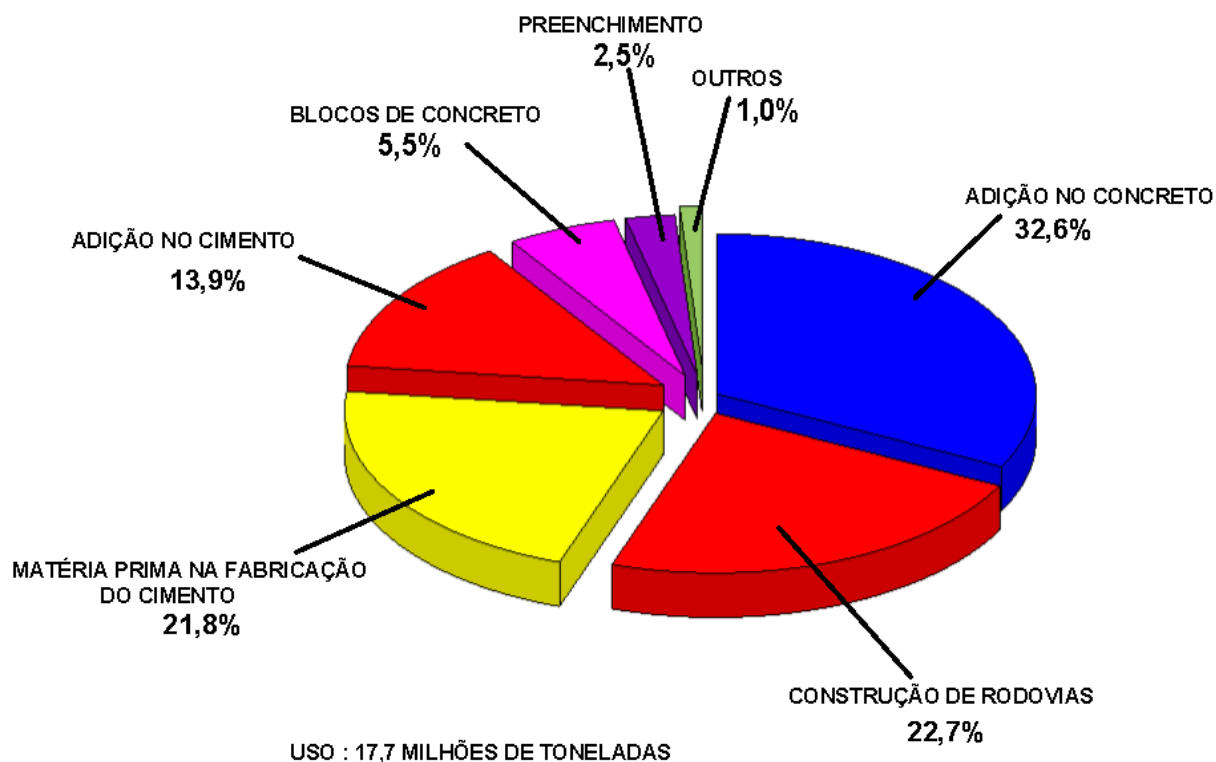


Figura 3 - Uso da cinza volante na indústria da construção e minas subterrâneas em 2008

Fonte: Heidrich, Feuerborn e Weir (2013)

### Cinza de fundo (Bottom Ash)

A cinza de fundo é um material granular removido do fundo da fornalha sendo suas partículas mais grosseiras do que a cinza volante. Aproximadamente 2,4 milhões de toneladas desta cinza foram utilizadas na indústria da construção e os principais usos foram: 37% no uso de agregado fino para blocos de concreto e no concreto, aproximadamente 41% na construção de rodovias e aterros e aproximadamente 16% na produção de cimento. Na Figura 4 estão mostrados os usos deste material na Europa (HEIDRICH; FEUERBORN; WEIR, 2013).

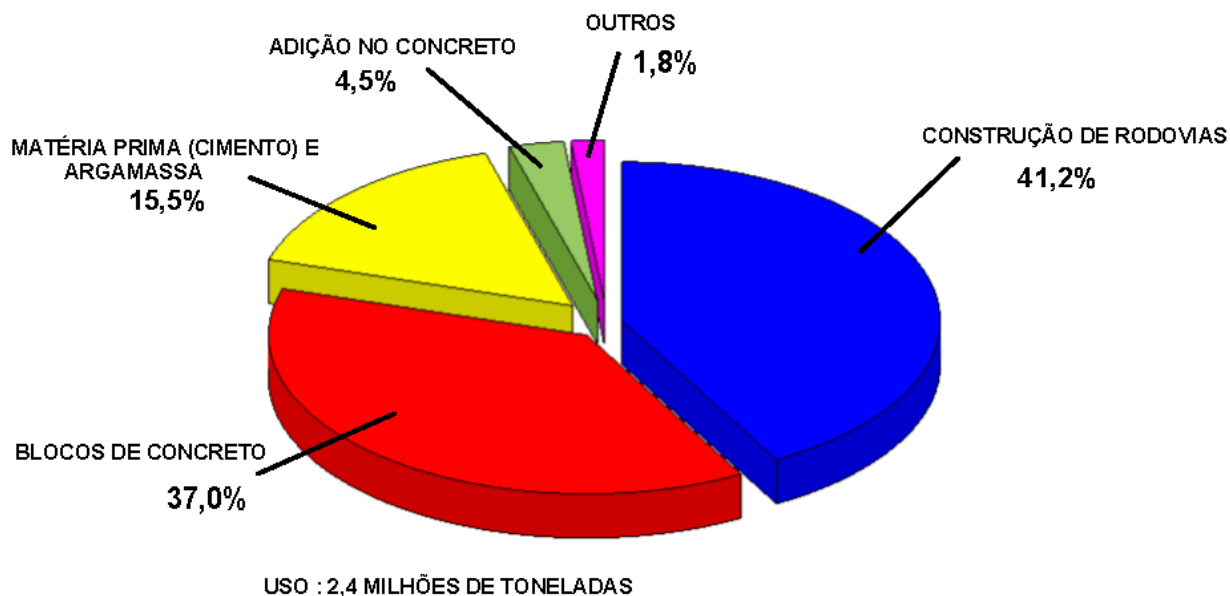


Figura 4 - Uso da cinza de fundo na indústria da construção e minas subterrâneas em 2008

Fonte: Heidrich, Feuerborn e Weir (2013)

### **Escória de caldeira (Boiler Slag).**

A escória da caldeira é a cinza de fundo fundida coletada no fundo da fornalha e fornos do tipo ciclone. Quando a escória fundida entra em contato com a água de extinção, ela se fratura, cristaliza e forma pastilhas. Este material de escória de caldeira é composto de partículas duras, pretas e angulares que têm uma aparência lisa e vítrea. A escória da caldeira é geralmente um material granular preto.

As partículas de escória da caldeira são de tamanho uniforme, duras e duráveis, com uma boa resistência ao desgaste da superfície. Além disso, a cor preta permanente deste material é desejável para aplicações de asfalto e ajuda no derretimento da neve.

Uso, principalmente é para jateamento de areia (44%) e 30% em construção de rodovias. Na Figura 5 (HEIDRICH; FEUERBORN; WEIR, 2013), estão mostrados os usos para a escória de caldeira na Europa.

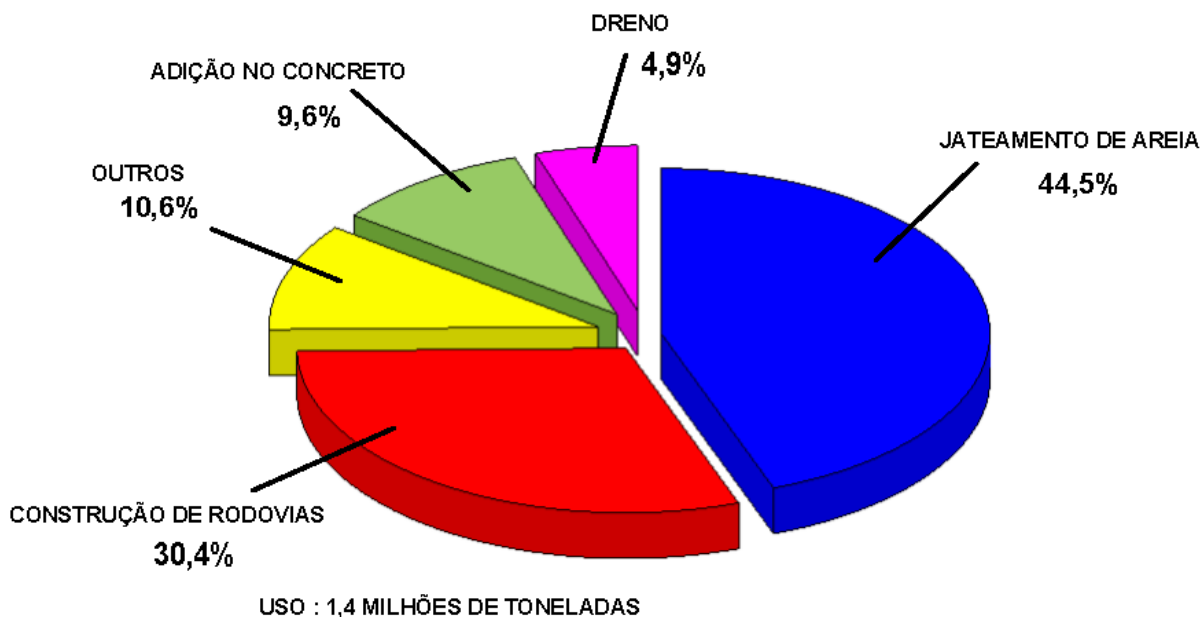


Figura 5 - Uso da escória de caldeira na indústria da construção e no jateamento de areias

Fonte: Heidrich, Feuerborn e Weir (2013)

### **Cinza da combustão em leito fluidizado (fluidized bed combustion ash-FBC)**

Esta cinza é gerada em caldeiras de leito fluidizados. A técnica combina a combustão do carvão com a dessulfuração dos gases de combustão, com o objetivo de abater o enxofre, sendo que a temperatura da caldeira está na faixa de 800 a 900°C.

O FBC é rico em cal e enxofre. Em 2008 aproximadamente 0,2 milhões de toneladas foram principalmente usados para aplicação em aterros (53%) e para aterros estruturais (11%). Na Figura 6 (HEIDRICH; FEUERBORN; WEIR, 2013), estão mostrados os usos deste material na Europa.



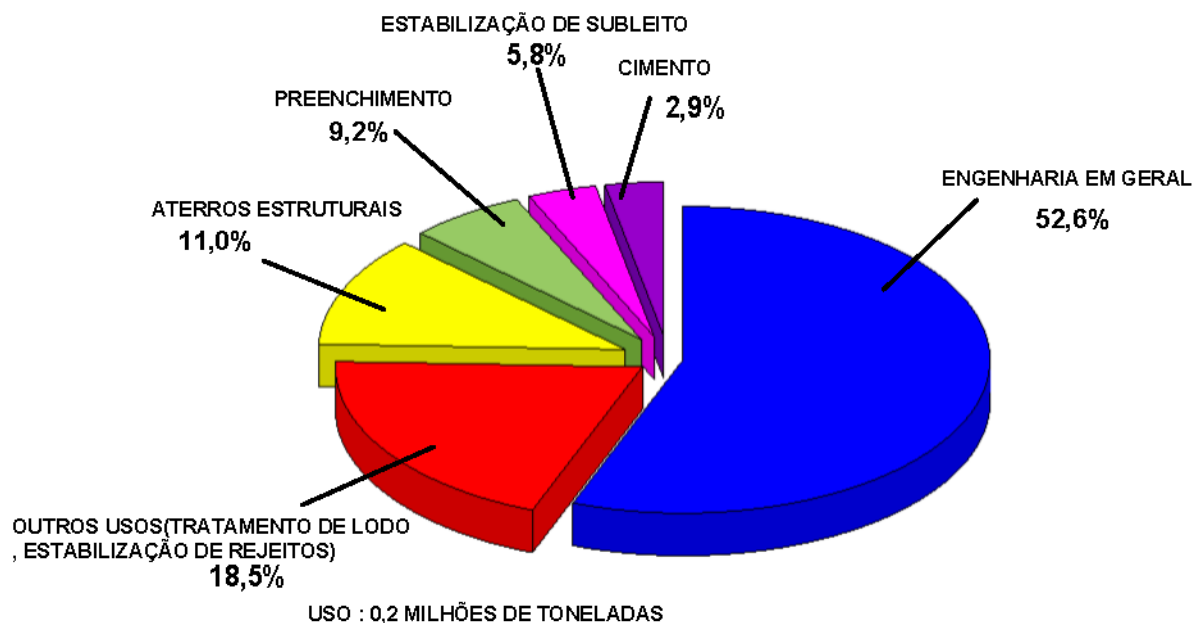


Figura 6 - Uso da cinza da combustão em leito fluidizado na indústria da construção e em minas subterrâneas.

Fonte: Heidrich, Feuerborn e Weir (2013)

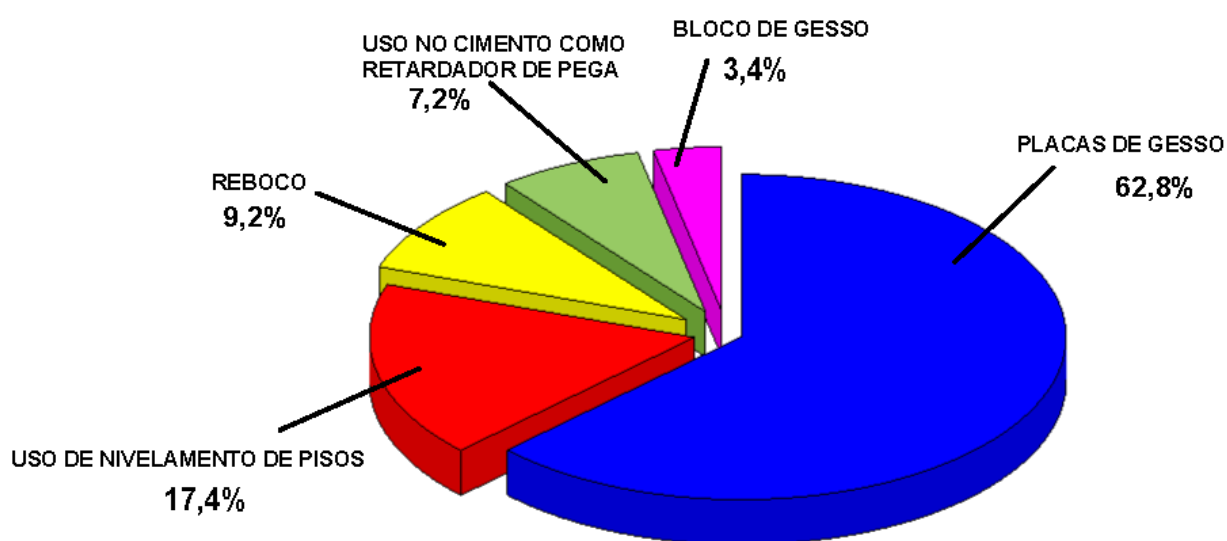
### Gesso da dessulfuração de gases da combustão (Flue-Gas Desulfurization Gypsum)

A dessulfuração dos gases de combustão é um processo químico para remover os óxidos de enxofre dos gases de combustão das usinas de queima de carvão. Muitos métodos FGD foram desenvolvidos para diferentes estágios de aplicabilidade. Seu objetivo é combinar quimicamente os gases do enxofre liberados na combustão do carvão, reagindo-os com um sorvente, como calcário (carbonato de cálcio,  $\text{CaCO}_3$ ), cal (óxido de cálcio,  $\text{CaO}$ ) ou amônia ( $\text{NH}_3$ ). Dos sistemas FGD nos Estados Unidos, 90% usam calcário ou cal como sorvente. A medida que o gás de combustão entra em contato com a pasta de sais de cálcio, o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) reage com o cálcio para formar sulfato de cálcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou gesso.

Certos materiais produzidos por algumas usinas de energia em um processo de oxidação e base de cálcio para lavagem de emissão de ar, é chamado de gesso FGD (ou sintético). O gesso FGD é o gesso precipitado formado através da neutralização do ácido sulfúrico. Embora o material possa variar em pureza, que é definido como a porcentagem de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , geralmente é superior a 94% quando é usado na fabricação de placas de parede. Como este material é muito consistente quando produzido por usinas de energia, os fabricantes de placas de parede geralmente estarão localizados adjacentes à usina para permitir que o material FGD

seja entregue diretamente às plantas de placas de parede. Esta relação sinérgica não só é economicamente atrativa, mas reduz a necessidade de mina de gesso natural e, portanto, tem um impacto ambiental positivo.

São gerados, aproximadamente, 8 milhões de toneladas deste produto, sendo que, 63% são usados na produção de placas de gesso. Outra aplicação incluem a produção de blocos de gesso (30%) para habitação e na indústria de cimento como retardador de pega (7%). Na Figura 7 (HEIDRICH; FEUERBORN; WEIR, 2013), são mostrados o uso deste material na Europa.



USO :8,8 MILHÕES DE TONELADAS

Figura 7 - Uso do FGD-Gypsum na indústria da construção.

Fonte: Heidrich, Feuerborn e Weir (2013)

## 2.3 PANORAMA DO USO DAS CINZAS NO BRASIL

Na Figura 8 são indicadas as principais termelétricas à carvão, em operação, há também um indicativo de local dos futuros empreendimentos destas termelétricas. É de conhecimento público que a Usina Pampa Sul, localizada na região de Seival, no município de Candiota-RS, estará em operação em 2019.

Os resíduos da combustão de carvão do Brasil são produtos resultantes, exclusivamente, da combustão de carvão energético, também conhecido como carvão vapor. O carvão energético é empregado, hoje, principalmente na termelétricidade e subordinadamente em alguns segmentos industriais.

O consumo de carvão energético no Brasil, ao longo de sua história, apresentou mudanças significativas tanto na evolução de seu consumo quanto na diversificação de consumidores. No século XIX era utilizado em locomotivas e navios. Esta forma de consumo, tendo em vista as políticas governamentais, no setor de transportes, foi praticamente extinta na metade do século passado.



1 = CGTEE; 2 = PAMPA SUL; 3 = TRACTEBEL; 4 = FIGUEIRAS; 5 = PECÉM; 6 = ITAQUI

● EM OPERAÇÃO

● FUTUROS EMPREENDIMENTOS

Figura 8 - Empreendimentos futuros e em operação de Termelétricas  
Fonte: Autor (2017)

Na década de 1950, com o crescimento da demanda em energia elétrica, a termelétricidade passou a ser incentivada. O resultado dessa reestruturação foi a reabilitação, no sul do Brasil, do carvão MINERAL que passou a ter um consumo crescente até aproximadamente o final da década de 1970.

Mais de 90% do carvão energético, hoje, é consumido pelas usinas termelétricas, sendo o restante aproveitado por segmentos industriais que envolvem, na grande maioria, empresas de pequeno porte.

As termelétricas brasileiras que utilizam carvão como combustível estão situadas geograficamente próximo aos principais jazimentos carboníferos do país, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, onde o carvão é do tipo sub-betuminoso e sua combustão gera aproximadamente 50% de cinza, a exceção são as UTEs localizadas nos estados do Ceará (PECÉM) e Maranhão (ITAQUI), que o carvão é importado da Colômbia, na qual o carvão é do tipo Betuminoso, onde sua combustão gera aproximadamente 10 a 15% de cinzas.

No Rio Grande do Sul, existiam, três usinas termelétricas em atividade: Presidente Médici (CGTEE), São Jerônimo (CGTEE) e Charqueadas (TRACTEBEL). Atualmente, somente a UTE Presidente Médici está em operação, sendo que, das três Usinas, denominadas fases A, B e C, a única que está em operação é a fase C, que gera três tipos de resíduos: cinzas volante e de fundo e resíduo da dessulfuração (FGD), que tem em sua composição, cinza volante, cal hidratada e sulfatos e sulfitos de gesso. A UTE Pampa Sul, situada na região de Seival, município de Candiota-RS, ao contrário das outras UTEs do Brasil, que são do tipo carvão pulverizado ou leito de arraste, será do tipo leito fluidizado borbulhante, onde a temperatura de queima é de aproximadamente 900°C.

A termelétrica de São Jerônimo, de propriedade da CGTEE, operava desde 1952. Situada à margem do rio Jacuí, no município de São Jerônimo - RS, a 60km de Porto Alegre, constituía uma pequena e antiga unidade geradora de eletricidade de 20 MW, onde a combustão do carvão britado é feita em grelhas, gerando cinzas do tipo **boiler slag**. Essa usina foi desativada em 2010.

A termelétrica de Charqueadas, construída em 1962, é de propriedade da Tractebel Energia S.A. Situa-se na margem direita do rio Jacuí, no município de Charqueadas - RS. Tem potência instalada de 72 MW. Essa usina foi desativada em 2017.

Dentre as empresas que ainda utilizam o carvão mineral como combustível destacam-se como grandes geradoras de cinzas as empresas BRASKEM, do setor petroquímico, no município de

Triunfo - RS e Celulose Riograndense do setor da celulose, situada no município de Guaíba-RS (Tabela 4).

Tabela 4 - Produção de cinzas do carvão de usinas para gerar vapor no seu processo industrial.

Indústria Geradora	Produção de cinza do carvão anualmente (t)	
	Cinza Volante (fly ash)	Cinza de Fundo (bottom ash)
BRASKEM	144.000	54.000
Celulose Riograndense	50.400	14.400

Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 5 estão indicados, os quantitativos de cinzas do carvão, gerados nas UTEs que estão em operação e em construção. Os quantitativos de cinzas do carvão, calculados, foram em relação a potência máxima instalada, pois as termelétricas podem variar sua potência instalada variando a produção destas cinzas.

Tabela 5 - Produção de cinzas do carvão das termelétricas brasileiras.

SITUAÇÃO	UNIDADE GERADORA	POTÊNCIA INSTALADA (MW)	CAPACIDADE MÁXIMA DE PRODUÇÃO (t/ano)		
			CINZA VOLANTE	CINZA DE FUNDO	FGD
EM ATIVIDADE	CGTEE-RS (FASE C)	350	1.041.390	347.130	2.520
	JORGE LACERDA – SC	857	2.554.546	851.515	
	FIGUEIRAS -PR	20	119.232	39.744	
	PECÉM I e II - CE	720		214.617	643.852
	ITAQUI - MA	360		107.309	321.926
<b>SUB-TOTAL</b>			<b>3.715.168</b>	<b>1.560.315</b>	<b>968.298</b>
EM CONSTRUÇÃO	PAMPA SUL -RS	680			2.702.592
<b>SUB-TOTAL</b>					<b>2.702.502</b>
<b>TOTAL</b>			<b>3.715.168</b>	<b>1.560.315</b>	<b>3.670.800</b>

Fonte: Autor (2017)

Os primeiros registros de emprego expressivo das cinzas da combustão de carvão, no Brasil, com base científica, datam na década de 1960, com a construção das estruturas de concreto no

complexo hidroelétrico de Jupia, da então Centrais Elétricas de Urubupungá S.A. – CELUSA no estado de São Paulo (ROHDE, 2006).

O interesse pelas cinzas resultou de estudos realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT/SP, que revelaram a capacidade das cinzas, a partir de suas propriedades pozolânicas, de inibir reações expansivas de agregados naturais (cascalho - principal fonte de agregado) com os álcalis do cimento Portland.

A partir destes resultados passou-se a empregar, na etapa inicial dos trabalhos, como material pozolânico, as cinzas volantes das termelétricas de Charqueadas e Candiota I do Rio Grande do Sul.

No ano de 1964, na obra de Jupia, pertencente ao Complexo Urubupungá, foram utilizadas cerca de 40.000t de cinzas volantes de Candiota I, transportadas por via férrea, a uma distância de 1800km e aplicadas na construção da barragem de concreto, substituindo o cimento Portland em percentagens de até 30%, com notáveis vantagens técnicas e econômicas.

Na década de 1960, motivados na experiência europeia e norte-americana, iniciaram-se no Brasil os primeiros estudos de viabilidade para a fabricação de cimentos Portland pozolânicos. As primeiras tentativas foram conduzidas no sentido do aproveitamento das cinzas volantes de Charqueadas e Candiota.

A partir destas constatações foram estabelecidos contatos entre a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP com a Companhia Brasileira de Cimento e com a S/A Indústrias Reunidas F. Matarazzo. Esta última colaborou decisivamente, realizando uma série de ensaios, para a utilização das cinzas pela Companhia Brasileira de Cimento, tendo sido satisfatórios os resultados, o que proporcionou a programação do consumo naquela fábrica de 80t por dia.

Estudos paralelos nessa linha foram também conduzidos no RS, pelo Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul - ITERS (1969), atual CIENTEC, através de investigações laboratoriais que consistiram do desenvolvimento de um programa de pesquisa com a finalidade de verificar a influência da adição da cinza ao cimento Portland, no que se refere a resistência

química e mecânica das argamassas. Os resultados obtidos foram de extraordinária valia para a consolidação e difusão dos cimentos Portland pozolânicos no Brasil.

No Rio Grande do Sul e Santa Catarina, são produzidos somente cimentos Portland pozolânicos (CP-IV), sendo, na atualidade, a principal aplicação para as cinzas no Brasil.

Além das aplicações das cinzas em concretos e cimentos Portland outras possibilidades vem sendo testadas, para as cinzas sul brasileiras, desde a década de 1960, mas somente a nível de pesquisa.

A CIMENSUL, em 1966, atendendo solicitação da Comissão do Plano do Carvão Nacional - CPCAN procedeu testes para verificação da qualidade das cinzas volantes de Charqueadas e Candiota como material pozolânico, concluindo pela confirmação das propriedades pozolânicas. No mesmo ano as mesmas cinzas foram enviadas para os laboratórios da renomada empresa dinamarquesa, F.L. Smith & Co. As. Os resultados encontrados confirmaram as qualidades pozolânicas das referidas cinzas.

A Lee Lime Corporation, organização norte-americana, especializada em produtos à base de cinza volante, testou, em 1967, por solicitação da Termelétrica de Charqueadas S/A, cinzas volantes produzidas nesta usina. Os resultados foram excepcionais. A Lee afirmou que as cinzas de Charqueadas comparavam-se às cinzas volantes norte-americanas comercialmente usadas.

Nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, é prática comum, desde a década de 1960 o emprego de cinzas de carvão para a formação de aterros, ou como bota-fora (depósitos). Tratam-se de atividades que normalmente não tem obedecido as corretas técnicas construtivas e nem recomendações ambientais. Grande parte destes aterros ocupam lagoas de disposição final, preenchem cavas de minas abandonadas ou recobrem terrenos naturais, Figuras 9 e 10, respectivamente.



Figura 9 - Lagoa de disposição de cinzas volantes da Usina Termelétrica de São Jerônimo - RS, na década de 1990.

Fonte: Autor (2017)



Figura 10 - Cavas de minas de carvão exauridas parcialmente preenchidas por cinzas geradas na usina termelétrica Presidente Médici em Candiota - RS, na década de 1980.

Fonte: Autor (2017)

O DAER-RS, buscou, a partir da década de 1980, desenvolver técnicas construtivas apropriadas para aterros, com resíduos da combustão de carvão. Passou a fazer algumas investigações de campo e de laboratório em cooperação com a CIENTEC. Destacam-se os estudos realizados em corpos de aterros estradais, nos municípios de São Jerônimo e Charqueadas - RS.



A partir destes estudos algumas obras passaram a ser construídas de acordo com procedimentos técnicos recomendáveis, podendo-se destacar, entre as mais recentes, os aterros construídos nos encontros da ponte sobre o rio Jacuí que liga os municípios de São Jerônimo e General Câmara e da estrada de acesso a referida ponte a partir de São Jerônimo. Nestas obras cerca de 500.000m<sup>3</sup> de escórias de caldeira e cinzas de fundo de carvão foram utilizadas, Figura 11.

Na década de 1970 pesquisadores do Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR do Rio de Janeiro, do Departamento de Estradas de Rodagem – DER de Santa Catarina e da Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia – COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro tiveram a oportunidade de desenvolver várias pesquisas de laboratório dirigidas à melhoria e estabilização de solos pelo tratamento com cinzas volantes e cal hidratada. Buscavam estes pesquisadores resolver um problema frequente em obras de estradas que é a presença de solos inadequados para constituírem camadas de pavimentos.

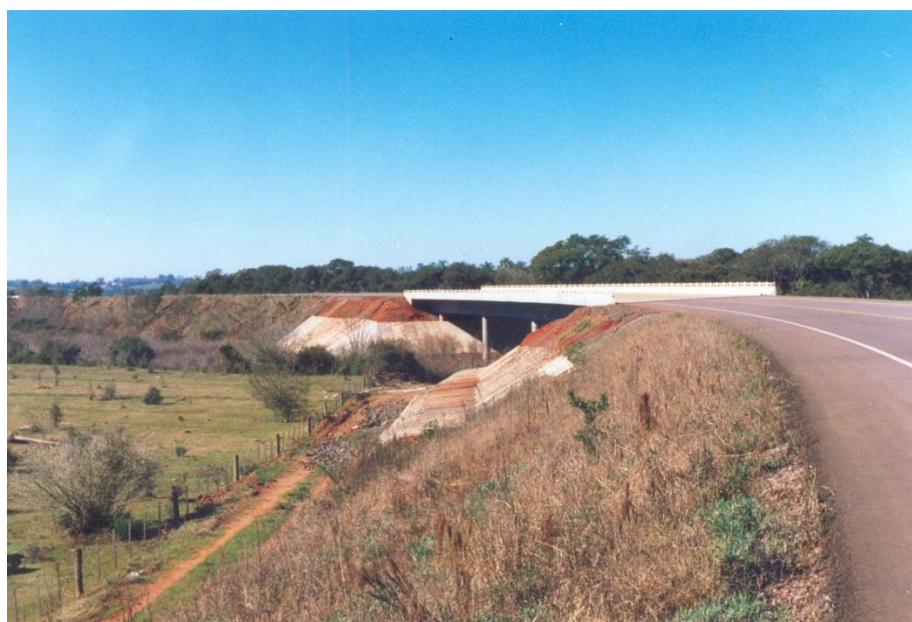


Figura 11 - Aterro estradal, entre os municípios de São Jerônimo - RS e General Câmara - RS, construído com cinzas das Usinas Termelétricas de Charqueadas-RS e São Jerônimo – RS, na década de 1990.

Fonte: Autor (2017)

As pesquisas realizadas nos laboratórios do IPR deram ensejo a dissertações de mestrado na COPPE – UFRJ e a inúmeras publicações em congressos, encontros e reuniões, cujos principais títulos são apresentados nas Referências Bibliográficas do presente documento, e

inspiraram, em 1976, o planejamento, construção e instrumentação da pista experimental, em desvio (tipo “bypass” à BR-101, entre os km 181,5 e 182,5), no município de Imbituba, Estado de Santa Catarina.

A pista experimental foi uma realização do IPR-RJ que teve apoio do 16<sup>o</sup> DRF e em particular da Residência de Tubarão - SC. O desempenho geral da mistura pozolânica, após uso sob a ação do tráfego da BR – 101, foi bom, não apresentando qualquer indício de mau comportamento o que comprovou a possibilidade deste tipo de pavimento.

Apresentada a experiência na 13<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, realizada em Curitiba em 1977, sob o título “Misturas do tipo areia – cal – cinza volante: Pista experimental de Santa Catarina” foi merecedora do Prêmio Pontes de Corrêa e do Prêmio Asfaltos Chevron.

Apesar do grande potencial demonstrado pelas cinzas volantes como materiais de construção na pavimentação, são raramente empregadas no Brasil, em obras viárias, sobretudo porque são poucos os especialistas empenhados em levar adiante as tecnologias já desenvolvidas e também o desinteresse, dos órgãos rodoviários, em adotar materiais e processos alternativos.

A partir da década de 1980 Universidades e Instituições de Pesquisas, principalmente no sul do Brasil, tiveram também uma boa participação na busca de novas formas de utilização das cinzas. A caracterização das cinzas, sobre os mais diferentes aspectos, bem como a preocupação com os aspectos ambientais, decorrentes do uso das cinzas, foram também objeto de vários trabalhos.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul patrocinou, na década de 1990, vários trabalhos de pós-graduação para alunos dos cursos de mestrado da Escola de Engenharia, alguns com o apoio técnico da CIENTEC, dirigidos principalmente para a avaliação das potencialidades das cinzas como materiais de construção, em áreas como construção civil e pavimentação, caracterização das cinzas e aspectos ambientais. Atualmente, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, continua com os estudos, usando dois resíduos: cinzas do carvão e cal de carbureto (e.g., CONSOLI et al., 2001, 2008, 2011, 2014a,b, 2015, 2016a,b, 2017; SALDANHA et al., 2016, 2017, SALDANHA and CONSOLI, 2016).

A Empresa Dagoberto F. Barcellos S.A. de Caçapava do Sul após investigações nos seus laboratórios passou a produzir, na década de 1990, cales hidráulicas, resultantes de misturas de cinzas volantes da Usina da CGTEE, no município de Candiota-RS, com cales hidratadas.

## **EXPERIÊNCIA DA CIENTEC**

Estudos e pesquisas voltados ao aproveitamento de resíduos da combustão de carvão vem sendo desenvolvidos na Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC desde a década de 1940.

O registro mais antigo data de 1948, ano em que o Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul – ITERS, antecessor da CIENTEC, foi responsável pela construção, na cidade de Porto Alegre, de pavimentos com bases constituídas de cinza de carvão, areia e cal. A cinza era procedente da usina termelétrica do Gasômetro, na Ponta da Cadeia, em Porto Alegre. Desativada em 1974, seu prédio, tombado pelo patrimônio histórico, abriga o Museu do Trabalho, constituindo-se, especialmente sua chaminé, em importante ponto de referência da Capital (Porto Alegre). O nome gasômetro deve-se ao fato de ter sido construída próximo a usina de gás, cuja localização era popularmente chamada de volta do Gasômetro.

No início da década de 1960 após posicionamento favorável do DNER, quanto a utilização das cinzas volantes de Charqueadas como filer em misturas betuminosas, o ITERS, em 1964, a pedido da usina termelétrica de Charqueadas aprofundou estes estudos, em parceria com os laboratórios LEMIT da Argentina (Laboratório de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigacion Tecnológica, órgão do Estado da Província de Buenos Aires). Os resultados foram favoráveis. O DAER do Rio Grande do Sul chegou a empregar, naquela época, cinzas de Charqueadas como filer em acostamentos de rodovias.

A partir de 1981, com o crescimento dos problemas ambientais resultantes da disposição irregular de um dos recursos minerais mais produzidos no estado do Rio Grande do Sul (cinzas de carvão mineral) a CIENTEC, através do Departamento de Geotecnia - DEPGEO, elaborou um programa de trabalhos, que perdurou até 1999, voltado ao desenvolvimento de aplicações que pudessem absorver prontamente e de forma integral, grandes volumes destes resíduos.

Nas Figuras 12 e 13, estão mostrados os produtos desenvolvidos na CIENTEC, que são os projetos CICASOL e CINCAL, respectivamente.



Figura 12 - Pavimento de base de cinza volante e cal hidratada no Polo Petroquímico de Triunfo, 6 km – CICASOL.  
Fonte: Autor (2017)



Figura 13 - Casa de blocos cinza/cal construída na Vila tecnológica no Município de Porto Alegre em 2003 – CINCAL.  
Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 6 estão indicados alguns projetos desenvolvidos pela CIENTEC.

Tabela 6 - Pesquisas desenvolvidas na CIENTEC aproveitando da cinza do carvão.

PESQUISAS DESENVOLVIDAS NA CIENTEC	ANO
TRECHOS EXPERIMENTAIS DE PAVIMENTOS EM PORTO ALEGRE	
BASE CONSTITUÍDA DE CINZA VOLANTE+CAL+AREIA,  PROCEDÊNCIA DA CINZA : USINA DO GASÔMETRO	1947
UTILIZAÇÃO PELO DAER DE CINZAS VOLANTES COMO FILER EM CONCRETO ASFÁLTICOS	1960-65
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DE AGREGADOS LEVES A PARTIR DA CINZA VOLANTE PARA EMPREGO EM CONCRETO	1964-67
ESTUDOS SOBRE INCORPORAÇÃO DE CINZAS VOLANTES EM CIMENTOS PORTLAND - PRIMEIROS ESTUDOS NO BRASIL	1968-69
PROJETO AGLOTEC (CALCINAÇÃO DE CARVÃO + CALCÁRIO IMPURO) - DESENVOLVIMENTO DE AGLUTINANTE HIDRÁULICO (APLICAÇÃO EM REBOCO E JUNTAS) DE TIJOLOS)	1980
PROJETO CICASOL - UTILIZAÇÃO DE CINZA VOLANTE + AREIA + CAL HIDRATADA, PARA APLICAÇÃO DE BASE DE PAVIMENTO.	1981
UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE FUNDO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO DE ATERROS.	1986
UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE FUNDO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO DE ATERROS.	1996
PROJETO CIPECAL - EMPREGO DE CINZAS DE FUNDO COM CAL HIDRATADA PARA FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS DE ALVENARIA	1999
PROJETO ZEÓLITAS - FABRICAÇÃO DE ZEÓLITAS DE CINZA VOLANTE PROJETO ZEOTEC - EMPREGO DAS ZEÓLITAS COMO PURIFICADOR	2001-03

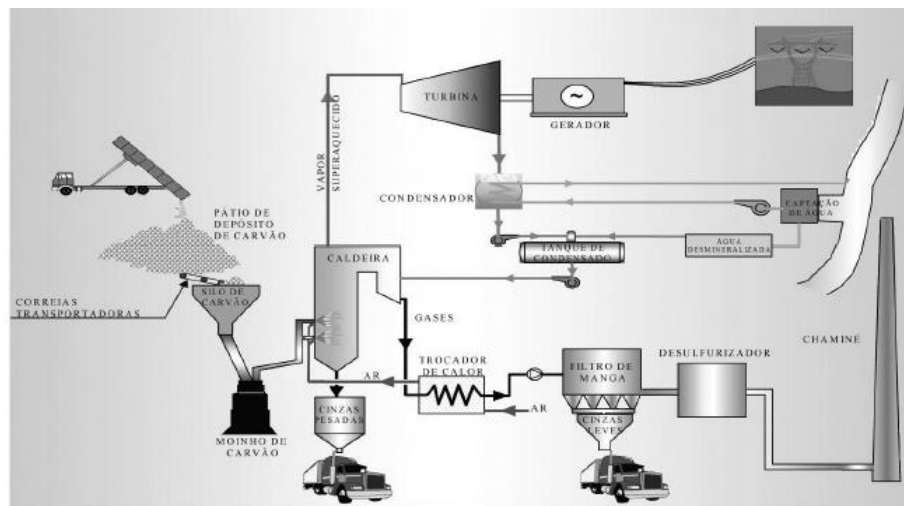
Fonte: Autor (2017)

## 2.4 ANÁLISE DO CARVÃO MINERAL NO SUL DO PAÍS

A tecnologia de carvão pulverizado, desenvolvida nos anos 20, é a mais difundida e utilizada nas usinas termelétricas em operação, no Brasil, permitindo a queima de carvões de baixa

qualidade. Essa tecnologia corresponde a cerca de 90% da capacidade mundial instalada de geração com carvão (IEA, 2009).

O carvão é moído em partículas finas (entre 75 e 300  $\mu\text{m}$ ) e injetado, juntamente com ar, numa câmara de combustão onde é queimado, alcançando-se temperaturas da ordem de 1.300 a 1.700  $^{\circ}\text{C}$ , dependendo da qualidade do carvão. O calor produzido gera vapor que aciona a turbina a vapor. O tempo de residência das partículas de carvão na caldeira são da ordem de 2 a 5 segundos e essas partículas devem ser pequenas o suficiente para permitir sua combustão completa (OLIVEIRA, 2013). Um esquema representativo de seu funcionamento é apresentado na Figura 14.



Fonte: EPE, 2007

Figura 14 - Fluxograma simplificado: Carvão Pulverizado.

Fonte: EPE (2007)

Em função das altas temperaturas alcançadas na caldeira, esse processo possui elevado teor de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e quantidade expressiva de material particulado de pequeno diâmetro nos gases de exaustão. Além disso, apresenta risco de fusão das cinzas em função das temperaturas não uniformes na câmara de combustão, podendo conduzir a uma fusão total ou parcial. Outro fator negativo dessa tecnologia é sua intolerância a carvões com alto teor de inertes e alta umidade, como é o caso da maioria dos carvões encontrados no Brasil (OLIVEIRA, 2013).

Segundo EPE (2007), o carvão pulverizado é considerado uma tecnologia de queima limpa quando complementada por sistemas modernos de controle de  $\text{NO}_x$ , de dessulfurização de gases (FGD) e de remoção de material particulado (OLIVEIRA, 2013).

Na queima do carvão pulverizado na fornalha das caldeiras, a ignição das partículas de carvão ocorre rapidamente e o contato entre elas é pequeno e insuficiente, na maioria das vezes, para promover condições de equilíbrio de reação. Nesta situação cada partícula apresentará comportamento e características diferentes quanto à viscosidade, ponto de fusão e conteúdo químico de sólidos e gases, resultando em partículas de cinza com características químicas, físicas, mineralógicas e microestruturais distintas (KIHARA, 1986).

Portanto, a avaliação da eficácia da queima do carvão é importante para a definição das cinzas do carvão resultantes, haja visto que uma queima inadequada resulta em teor elevado de carbono residual e em heterogeneidade das características físico-químicas das partículas.

## 2.5 CARACTERÍSTICAS DAS CINZA DE CARVÃO PULVERIZADO NO BRASIL

Tratam-se de cinzas originadas da combustão de carvão pulverizado em leito, conhecido como de arraste. A combustão em leito de arraste é o sistema mais importante no sul do Brasil, uma vez que é utilizado na maioria das termelétricas do Brasil, responsáveis por cerca de 95% do consumo do carvão mineral energético brasileiro (ROHDE, 2006).

O processo apresenta inúmeras vantagens sobre os demais. A combustão do carvão em pó permite a mistura homogênea e íntima entre este e o ar de combustão, proporcionando excelente queima, mesmo com combustíveis de qualidade inferior. A combustão do carvão pulverizado produz em média 75% de cinza volante e 25% de cinza de fundo. As cinzas de fundo por apresentarem uma granulometria mais grosseira, caem no fundo da fornalha. Já as cinzas volantes, sendo constituídas de partículas muito finas, acompanham os gases de combustão.

### 2.5.1 Características químicas

As características químicas das cinzas volantes sul brasileiras estão muito relacionadas com as características dos carvões que lhe dão origem. Tratam-se de carvões cuja matéria orgânica, em grande parte, apresenta-se microfragmentada e intimamente misturada a matéria mineral, tornando muito difícil a sua separação e concentração por meios convencionais de beneficiamento de carvão. Os teores de cinzas, resultantes da combustão destes carvões,

determinados ao longo de várias décadas, tem revelado uma grande uniformidade representando aproximadamente 50% da massa do carvão. Mais de 90% das cinzas de carvão pulverizado consistem de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Óxidos de cálcio, magnésio, sódio, potássio, titânio e outros podem também estar presentes em baixos teores.

A composição química das cinzas volantes foi determinada no Laboratório do DEQUIM da CIENTEC, de acordo com os procedimentos apresentados nas normas da ASTM D3682 (2013). Os resultados obtidos constam na Tabela 7. Para fins de comparação são apresentadas também composições típicas das cinzas volantes das principais usinas termelétricas sul-brasileiras e de duas unidades do segmento industriais.

Tabela 7 - Concentração dos constituintes maiores e menores em cinzas volantes sul-brasileiras obtidas a partir da queima de carvão pulverizado em usinas termelétricas e unidades do segmento industrial.

CONSTITUINTES MENORES E MAIORES	BRASKEM (%)	CELULOSE RIOGRANDENSE (%)	TERMELÉTRICA PRESIDENTE MÉDICI(CGTEE) (%)	TEMELÉTRICA JORGE LACERDA (%)
$\text{SiO}_2$	64,40	59,40	65,70	56,50
$\text{Al}_2\text{O}_3$	18,20	27,50	20,30	28,00
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6,50	2,10	4,60	6,40
$\text{TiO}_2$	0,80	1,15	0,69	1,31
CaO	2,15	2,20	0,37	0,92
MgO	0,88	0,43	0,46	0,45
$\text{K}_2\text{O}$	1,41	1,10	1,12	2,50
$\text{Na}_2\text{O}$	0,34	0,12	0,10	0,23
C	0,14	1,19	0,05	0,21
S	0,09	0,09	<0,05	<0,05

Fonte: Autor (2017)

## 2.5.2 Características físicas

### ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Um dos parâmetros importantes para o uso das cinzas volantes é a distribuição granulométrica. A distribuição dos tamanhos de grãos é crucial para algumas aplicações como cimentos e concretos e é incluída nas normas e especificações para esses materiais em muitos países europeus e da América do Norte.



Outros tipos de aplicações, que envolvem grandes massas, como em aterros, pavimentos, elementos de alvenaria, podem ser menos exigentes, tolerando pequenas variações na composição granulométrica.

É importante, contudo, manter um controle sistemático nas características granulométricas das cinzas geradas. A detecção de grandes desvios pode ser indicativa de problemas no beneficiamento e/ou combustão do carvão.

De uma forma geral as composições granulométricas, determinadas pelos processos convencionais para solos, tem mostrado uma extraordinária uniformidade ao longo dos anos, habilitando-as ao uso como índices de qualidade para fins de engenharia das construções.

Como regra as cinzas volantes de Candiota, assim como todas as cinzas sul brasileiras provenientes da combustão de carvão pulverizado, se situam na faixa de silte e areia finas. Resultados típicos, determinados no Laboratório de Solos do Departamento de Geotecnia da CIENTEC, de acordo com as normas da NBR 7181/88 e NBR 6508/84, NBR 6502/1995, revelam aproximadamente 65% de silte, 30% de areia fina e 5% de argila. O coeficiente de uniformidade varia entre 3,5 e 7,5.

### PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS

O peso específico dos grãos das cinzas de carvão é normalmente bem inferior às massas específicas dos solos argilosos, arenosos ou pedregulhosos e varia numa faixa aproximada entre  $20,50\text{kN/m}^3$  e  $22,00\text{kN/m}^3$ . As variações nas massas específicas estão relacionadas com a maior ou menor presença de cenosferas e de material carbonoso.

### SUPERFÍCIE ESPECÍFICA BLAINE

A superfície específica pode ser considerada como um dos parâmetros mais importante do que a distribuição granulométrica, principalmente para aplicações na construção civil em que as propriedades pozolânicas são de importância capital, uma vez que está mais relacionada com a reatividade esta está relacionada com a superfície específica e com as interações com outras partículas. Contudo a distribuição granulométrica é mais fácil de ser medida do que a superfície específica.

Este parâmetro, apesar de não ser correlacionável com a distribuição granulométrica, é usado, muitas vezes, em preferência a este último, como indicador da proporção de finos do material. Altos valores de superfície específica, geralmente implica em uma reatividade maior e conseqüentemente uma expectativa de melhoria nas propriedades mecânicas do produto final.

Análises de superfície específica Blaine, realizadas ao longo das últimas quatro décadas, tanto no laboratório do Departamento de Materiais de Construção Civil – DEMACC da CIENTEC, como em laboratórios de outras instituições nacionais, segundo os procedimentos recomendados pela NBR NM76/98, tem revelado valores que variam numa faixa entre  $2500\text{cm}^2/\text{g}$  e  $3500\text{cm}^2/\text{g}$ . Resultados fora desta faixa, para as cinzas volantes sul brasileiras, são excepcionais.

### CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

Estudos mineralógicos realizados, por instituições como ABCP, IPT e UFRGS, através de técnicas como microscopia, difratometria de raios-X, análises termodiferencial e termogravimétrica, combinados com análises químicas, mostraram que as cinzas volantes de Candiota, de uma forma geral, constituem-se predominantemente, de material vítreo de natureza sílico-aluminosa e em menor proporção de compostos cristalizados sob a forma de quartzo, mulita, hematita e com menor frequência cristobalita, caulinita, calcita, feldspato.

Destacam-se entre os grãos individuais formas vítreas esponjosas irregulares, não raro associadas a material carbonoso, com dimensões de 10 a 300 micrômetros e vítreas esféricas, incolores, amarelas, avermelhadas ou opacas, comumente com inclusões gasosas e dimensões médias entre 10 e 15 micrômetros. Grãos de quartzo de formas irregulares com dimensões, que variam de 5 a 60 micrômetros são relativamente frequentes. Distinguem-se ao mesmo tempo grãos opacos com formas tanto irregulares de material carbonoso, como esféricas de natureza metálica que muitas vezes exibem caráter magnético.

### CARACTERÍSTICAS DE RADIOATIVIDADE

Quanto à atividade radioativa, determinações feitas com detector Geyger-Muller, na UFRGS, mostraram uma atividade específica de  $0,23 \pm 0,03$  Bq/g. Este resultado indica muito baixa atividade radioativa, muito próxima da radiação cósmica de fundo a que constantemente estão expostas as pessoas.

## 2.6 FATORES QUE INFLUENCIAM A CINZA DA COMBUSTÃO DE CARVÃO PULVERIZADO EM SISTEMAS POZOLÂNICOS

Materiais pozolânicos são estruturas silicosas amorfas ou sílico-aluminosas amorfas que reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água para formar produtos de hidratação cimentícias (silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato-silicato de cálcio hidratado (CAH)).

Em muitas civilizações antigas, pozolanas eram usados para melhorar as propriedades da cal, e muitas estruturas ainda existem como um testemunho da durabilidade da argamassa de cal pozolânica e concreto. Evidência do uso de pozolanas foi encontrado no período neolítico (7000 AC) na Galiléia, na civilização minoica (2700 a 1450 AC) [2] e Grécia antiga (1500 AC) (PAVÍA, 2008 apud MALINOWSKI; JIANG, 2008).

Os romanos usaram pozolanas naturais e artificiais como o pó de tijolo e telha. De acordo com registros históricos, Morgan (1914), Hooper (1939), Plommer (1973) e Paviá (2008). O uso de aglutinantes de cal diminuiu com o desenvolvimento de cimentos no início do século XIX, no entanto, estes estão recuperando popularidade como uma alternativa ambientalmente sustentável ao concreto de cimento Portland.

A reação pozolânica de uma cinza de carvão depende de sua composição química e mineralógica, do tipo e proporção de suas partículas, superfície específica, do teor de cal, teor de umidade, tempo e temperatura de cura (MASSAZZA, 2007). Além disso, a velocidade da reação pozolânica pode aumentar na presença de sulfatos, como por exemplo, gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e outros produtos químicos como cloreto de sódio ( $\text{CaCl}_2$ ) e hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) (MASSAZZA, 2002).

Os fatores que influenciam a cinza do carvão mineral são: quantitativo das fases cristalina e vítrea, superfície específica, distribuição granulométrica, influência na determinação da interação com o óxido de cálcio, etc. Portanto, a ampla caracterização da cinza de carvão mineral é importante para trazer subsídios que possam auxiliar a compreensão do seu comportamento em sistemas pozolânicos.

### 2.6.1 Morfologia dos grãos de cinza volante

A análise morfológica das partículas da cinza volante se realiza por microscopia eletrônica de varredura. A forma e textura obtidas por esta análise, que podem ser observadas na Figura 15, apresenta partículas esféricas com superfície lisa, como há também partículas irregulares e de superfície rugosa, o que aumenta consideravelmente a área exposta do grão quando comparada a uma partícula esférica de superfície lisa e de volume/diâmetro equivalente, influenciando na superfície específica da partícula (HOPPE FILHO, 2008).

Na Figura 15A observa-se uma aglomeração de partículas, enquanto que na Figura 15B mostra partículas isoladas, esféricas e de superfície lisa. Nas Figuras 15C e 5D observa-se uma partícula de grande dimensão, que sofreu fusão parcial aglomerando partículas de menor diâmetro.

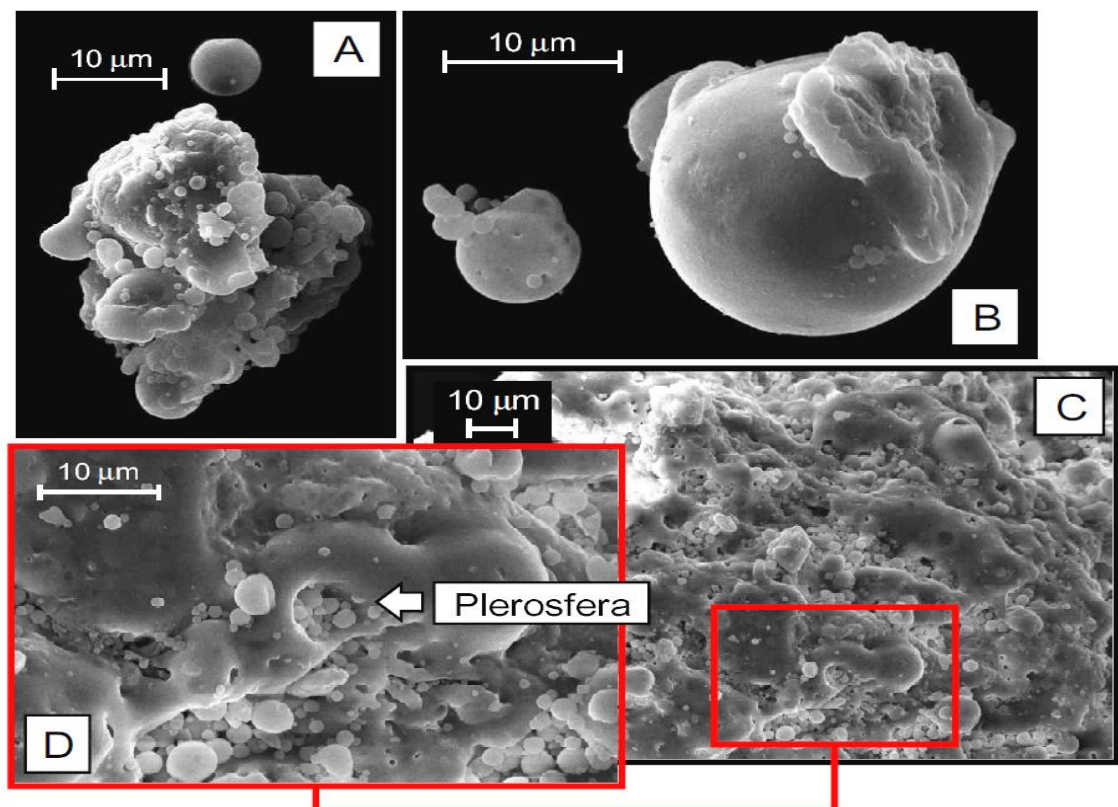


Figura 15 - Foto da cinza volante pelo MEV  
Fonte: Hoppe Filho (2008)

## 2.6.2 Composição química, mineralógica e estrutura amorfa da cinza volante

No trabalho de Paviá (2008) foi estudada a influência das composições química, mineralógica e estrutura amorfa de nove materiais pozolânicos. Este trabalho apresenta nas Tabelas 8, 9 e 10 os resultados da composição química e mineralógica junto com a estrutura da partícula dos materiais pozolânicos.

Ainda, segundo Paviá (2008), a reação pozolânica é regida pelos teores ativos de sílica e alumina e a superfície específica do material pozolânico. Uma superfície específica elevada facilita a reação pozolânica. No entanto, de acordo com Massazza (2007), isto se aplica apenas aos estágios iniciais da reação enquanto que em estágios mais longos, a reação pozolânica é controlada principalmente pelo teor de sílica e alumina ativa. Se observarmos na Tabela 8 o somatório das composições de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ , apresenta numa ordem decrescente os seguintes materiais pozolânicos: Metastar, RHA, MS, PFA, YBD, Leca, RBD, Tile and GGBS. No entanto, uma certa fração pode não estar ativa, portanto, a composição química não pode ser investigada sozinha, mas precisa levar em consideração a mineralogia e a proporção de estrutura amorfa (PAVIÁ, 2008).

Tabela 8 - Composição química de materiais pozolânicos.

Materiais Pozolânicos	Tipo de Cinzas	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$
Metastar	Argila Calcinada	51,37	45,26	96,63	ND	0,52	ND
RHA	Cinza da Casca do Arroz	93,84	1,93	95,77	0,68	0,29	ND
MS	Microsílica	92,10	2,13	94,23	1,10	1,62	0,28
<b>PFA</b>	<b>Cinza de Carvão Pulverizado</b>	<b>65,32</b>	<b>24,72</b>	<b>90,04</b>	<b>0,94</b>	<b>4,84</b>	<b>0,37</b>
YBD	Pó de Tijolo amarelo	43,90	44,94	88,84	0,36	2,11	ND
Leca	Escória de alto-forno	52,78	24,39	77,17	3,59	11,42	0,39
RBD	Pó de Tijolo vermelho	48,24	22,15	70,39	10,31	6,67	6,94
Tile	Telha moída	46,61	21,4	68,08	11,34	7,19	7,62
GGBS	Escória de alto-forno	34,14	13,85	47,99	39,27	0,41	2,43

Fonte: Paviá (2008)

ND= Não detectado

Conforme mencionado acima, os materiais pozolânicos, com grande proporção de estrutura amorfa e com apenas uma quantidade limitada de minerais cristalinos não-reativos são considerados muito ativos pozolânicamente, enquanto que as pozolanas com baixa proporção

de estrutura amorfa e uma quantidade considerável de minerais cristalinos são assumidos como possuindo uma atividade pozolânica fraca. De acordo com estes resultados as tabelas 9 e 10 mostram, em ordem decrescente, os materiais mais reativos pozolânicamente. O trabalho apresentado por Paviá (2011), conclui que a quantidade de estrutura amorfa é mais significativo para o crescimento da atividade da reação pozolânico do que o somatório da quantidade de óxido de sílica e alumina presente na sua composição química.

Tabela 9 - Análise qualitativa do material pozolânico quanto a sua estrutura amorfa e composição mineralógica cristalina

<b>Materiais Pozolânicos</b>	<b>Proporção de Estrutura Amorfa</b>	<b>Composição Mineralógica</b>
GGBS	Totalmente Amorfo	Sem Estrutura Cristalina
Metastar	Na Sua Maior Parte Amorfo	Quartzo, Óxido de Alumínio
MS	Na Sua Maior Parte Amorfo	Quartzo, Cristobalita
RHA	Na Sua Maior Parte Amorfo	Quartzo, Cristobalita

Fonte: Paviá (2008)

Tabela 10 - Análise qualitativa do material pozolânico quanto a sua estrutura amorfa e composição mineralógica cristalina

<b>Materiais Pozolânicos</b>	<b>Proporção de Estrutura Amorfa</b>	<b>Composição Mineralógica</b>
Leca	Intermediário	Quartzo, Mulita, Ilita
PFA	Ligeiramente Amorfo	Quartzo e Picos de Mulita
RBD	Ligeiramente Amorfo	Quartzo, Hematita, Gypsum
Tile	Ligeiramente Amorfo	Quartzo, Hematita, Gypsum
YBD	Ligeiramente Amorfo	Mulita

Fonte: Paviá (2008)

### 2.6.3 Tamanho das partículas e superfície específica

A importância da determinação da distribuição granulométrica da cinza volante está no conhecimento da amplitude da distribuição da dimensão de suas partículas e na frequência em que elas ocorrem. Este parâmetro tem como consequência no resultado da área específica do material, por exemplo, a moagem da cinza volante libera as partículas das plerosfera e altera a

amplitude de diâmetros e a frequência com que eles ocorrem e conseqüentemente aumenta a área específica BET.

O tamanho da partícula e a superfície específica são importantes porque eles afetam a reatividade das partículas de cinza. Ainda segundo o trabalho de **Área de Superfície Específica (cm<sup>2</sup>/g)** os materiais pozolânicos Metastar, RHA, GGBS e PFA são as pozolanas mais finas (mais finos do que a cal). Na Tabela 11 estão os resultados da superfície específica pelo método BET.

Tabela 11 – Resultados da superfície específica de materiais pozolânicos

Materiais Pozolânicos	Área de Superfície Específica (cm <sup>2</sup> /g)	Materiais Pozolânicos	Área de Superfície Específica (cm <sup>2</sup> /g)
MS – (3) -	236.900	Tile – (8)	41.600
Metastar – (2)	183.300	PFA – (6)	40.900
RHA – (4)	137.000	GGBS – (1)	26.500
RBD – (7)	42.900	Leca – (5)	12.800
		YBD – (9)	3.100

Fonte: Paviá (2008)

A Tabela 11 mostra uma numeração entre parênteses que é em ordem decrescente a análise qualitativa da estrutura amorfa dos materiais pozolânicos indicados nas tabelas 9 e 10. Este estudos apresentados (PAVIÁS, 2011) mostra que a estrutura amorfa é mais significativa do que a superfície específica nos resultados da atividade pozolânica quando se compara materiais com propriedade pozolânicas, como podemos observar no material pozolânico denominado “MS”, ele apresenta a maior superfície específica mas foi o terceiro material que apresentou a maior atividade pozolânica devido a sua estrutura amorfa que em termos qualitativo ficou em terceiro lugar.

A determinação da área específica, preconizada pela norma NBR 7224/96 (NBRNM 76/98), é determinada pelo permeabilímetro **Blaine**, com o qual mede o tempo requerido para uma determinada quantidade de ar fluir através de uma camada de amostra compactada, de dimensões especificadas e porosidade calculada.

Pelo método BET – Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller, publicado em 1938, baseia-se na adsorção física de moléculas de um gás inerte na superfície externa e na superfície interna de todos os poros abertos e interligados das partículas do sólido ensaiado. Na Figura 16, podemos observar que há poros que não são recobertos pelas moléculas do nitrogênio. Há, portanto, poros abertos que são considerados fechados desde que a abertura do poro seja inferior ao diâmetro do átomo de nitrogênio (raio atômico do nitrogênio:  $65 \times 10^{-12} \text{m}$ ).

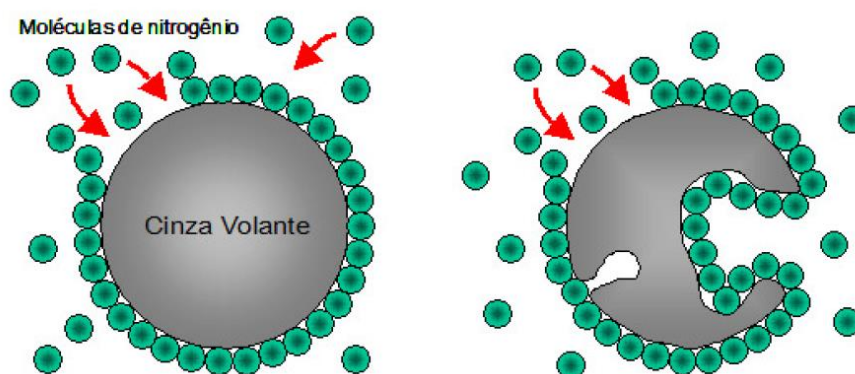


Figura 16 - Camada molecular do nitrogênio adsorvido estimada através do método BET.

Fonte: Hoppe Filho (2008)

Como a área específica BET considera a superfície externa dos poros abertos e interligados da cinza volante, o resultado poderá ser 5,4 vezes maior que a determinada no ensaio Blaine. Neste ensaio, baseado no fluxo contínuo de ar, não há consideração da área situada em reentrâncias e em poros internos conectados com a área externa, resultando em área específica inferior à determinada através da teoria BET, Portanto, a área específica BET é a mais representativa quanto à disponibilidade para contato de partículas com o meio aquoso e interação com as espécies químicas presentes (HOPPE FILHO, 2008).

No trabalho de Paviá (2011) a conclusão sobre os fatores mais significativos no sistema pozolânicos (material pozolânicos + cal hidratada + água) são:

- a) a quantidade de estrutura amorfa é o fator mais significativo na reatividade de materiais pozolanas do que qualquer outra propriedade;



- b) a área de superfície específica de materiais pozolânicos é o principal fator que governa a quantidade de água na mistura. Maior superfície específica maior quantidade de água na mistura;
- c) a composição química de materiais pozolânicos não afeta, significativamente, na reatividade da partícula e resistência da mistura;
- d) os resultados referentes aos materiais pozolânicos citados na Tabela 8, indicam que a resistência à compressão da mistura (pozolana + cal hidratada) depende da quantidade da cal combinada com a pozolana, o tipo de produto de hidratação formado após a reação pozolânica e o empacotamento (diminuição da porosidade) físico induzido pela mistura, no entanto o aumento da resistência se dá principalmente pelo aumento da estrutura amorfa e a diminuição do tamanho da partícula do material pozolânico e o aumento da área da superfície específica.

Pavía (2011) resume que o comportamento e propriedades da mistura de cal hidratada com materiais pozolânicos são determinados por relações complexas de interdependências de variáveis, incluindo a área de superfície específica, tamanho dos grãos, composição química e quantidade de estrutura amorfa. Estes determinam a quantidade de água e afetam as propriedade mecânicas e a reatividade pozolânica.

## 2.7 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)

### 2.7.1 Definição

O Concreto Compactado com Rolo-CCR é um produto de cimento Portland, sendo um material durável usado para, estacionamento, área de armazenamento, barragens e como base para pavimentos convencionais. O CCR é uma mistura de concreto com zero-slump (mistura seca) e que é colocada compactado com o mesmo equipamento usado para pavimentação de solos. É um método rápido e econômico de construção que não requer acabamento ou texturização superficial (TAYLOR, 2012).

The American Concrete Institute (ACI) define que "O CCR é um concreto compactado por rolo, e que em seu estado não endurecido, suportará este equipamento, enquanto estiver sendo compactado". Embora muitas das propriedades do CCR sejam semelhantes ao concreto

convencional, o concreto compactado pode ser usado com consumos de cimento abaixo das faixas utilizada no concreto convencional. No passado este material era denominado de concreto rolado e concreto passado com rolo (TAYLOR, 2012).

Segundo Andrade (1997), o Concreto Compactado com Rolo (CCR) é um concreto de consistência seca, não mensurável pelo ensaio de abatimento do troco de cone, e se diferencia do concreto convencional principalmente no que diz respeito à trabalhabilidade e consistência.

Para sua consolidação efetiva, o CCR deve ser suficientemente “seco” para suportar o peso do equipamento de adensamento (rolo liso vibratório) e, convenientemente úmido para permitir a adequada distribuição da pasta ligante na massa de concreto durante as operações de mistura, espalhamento e compactação, apresentando no final, depois de endurecido, as características comumente obtidas no concreto convencional.

Gallo e Padilha (1991) destacam que o desenvolvimento tecnológico do CCR está calçado, em diferentes países, nas experiências com solo-cimento e brita graduada tratada com cimento (BGTC).

De acordo com Andriolo (1989) o CCR adequado para compactação com rolos vibratórios também difere significativamente no aspecto, em seu estado ainda não adensado, em relação ao concreto convencional que possui um valor mensurável de trabalhabilidade, pois a evidência da pasta na mistura do CCR não adensado é pequena, sendo que o teor de pasta só é notado na mistura compactada.

Gagné (1999) comenta que os métodos de proporcionamento do CCR podem ser baseados em testes de consistência de concretos, em testes de compactação de solos, ou em algum modelo teórico contínuo de suspensão de sólidos diferente dos métodos de proporcionamento usualmente adotados para o concreto convencional, sendo este modelo chamado de *solid suspensium model*.

O Concreto Compactado com Rolo-CCR é um concreto de consistência seca e de trabalhabilidade tal que se compacta por vibração externa com equipamento de rolo vibratório. Seu consumo de cimento pode variar entre 40 até 380kg/m<sup>3</sup>, para baixos consumos

o CCR apresenta uma aparência semelhante a uma brita graduada tratada com cimento (BGTC).

Historicamente pode-se dizer que o primeiro concreto compactado com rolo foi construído em 1893, em Bellefontaine nos Estados Unidos, no estado de Ohio corresponde o mais antigo pavimento de concreto que se conhece. O CCR foi utilizado como camada inferior de um pavimento composto. O consumo de cimento foi baixo e sua compactação foi realizada por compressão. Outras obras podem ser mencionadas e seu ano de execução (PITTA, 1994):

1910 – ruas em Grand Forks, Dakota do Norte, Estados Unidos;

1935 – estradas Rurais, Bélgica;

1944 – estradas em Crawley, rodovia Londres – Birmingham, Inglaterra;

1950 – pista experimental na rodovia 441, Estados Unidos;

1950-1960 – estradas no Texas, Carolina do Sul e outros Estados do Estados Unidos;

1960 – 1990 – vários pavimentos nos Estados Unidos(estradas, pisos industriais, aeroportos, etc.).

ABCP (2017) apresenta algumas obras de pavimento de concreto no Brasil:

Pernambuco BR 101 NE Recife - Natal 2010;

São Paulo - Corredor de Ônibus Roque Petroni 2006;

São Paulo - Rua Xavier de Toledo 2003;

Rio de Janeiro - Corredores de ônibus Transcarioca 2014;

Paraná - Linha Verde Sul - Curitiba 2008;

Santa Catarina - Acesso ao Porto de Imbituba - Imbituba 2016;

Rio Grande do Sul - BRT Osvaldo Aranha/Protásio Alves/João Pessoa/Bento Gonçalves Porto Alegre 2015;

Rio Grande do Sul - Corredor de ônibus Avenida Bento Gonçalves - Pelotas 2016;

Rio Grande do Sul - Terminal de ônibus Imigrantes - Caxias do Sul 2015;

Rio Grande do Sul - Terminal de ônibus Floresta - Caxias do Sul 2015.

Das utilizações mais tradicionais em pavimentação, destaca-se a utilização como sub-base de pavimentos de concreto simples, base de pavimentos asfálticos e base e revestimento de pavimento de concreto, (DNER, 1992). Sua aplicação como sub-base tem a função de eliminar o fenômeno de bombeamento de finos plásticos eventualmente existentes no subleito, evitar os efeitos de retração e expansão de volume dos solos do subleito, e aumentar a capacidade de suporte torna-lo razoavelmente uniforme ao longo da faixa do pavimento (GROSSI, 1989). Como base de pavimentos asfálticos, o CCR deve apresentar valores de resistência à compressão simples, aos 28 dias de idade entre 5MPa e 8Mpa (GODINHO, 1988).

Por outro lado, o CCR utilizado como base e revestimento deve suportar o carregamento repetitivo, móvel ou estático do pavimento bem como os reforços solicitantes de tração na flexão e resistir aos esforços de desgaste de abrasão aplicados aos pavimentos (GOSSI, 1989).

Nos concretos secos como nos concretos plásticos, a dosagem nada mais é do que a busca da melhor composição dos materiais constituintes, de forma que, no estado fresco, o concreto seja trabalhável, permitindo adequada moldagem das peças e que após o endurecimento, elas tenham qualidade assegurada. Nos concretos plásticos praticamente a pasta (cimento mais água) ocupa todos os vazios entre os agregados; por outro lado nos concretos secos, existe a presença de ar em volume significativo na mistura. Deste modo, o concreto seco não segue no princípio consagrado para concretos plásticos que é a necessidade de uma menor quantidade de água para elevação da resistência mecânica (TANGO, 1994). Conseqüentemente, a dosagem dos concretos secos é geralmente executado pelo método de menor volume de vazios ou seja, consiste em encontrar a melhor proporção entre os agregados de maneira a propiciar o menor volume de vazios possíveis entre os agregados componentes do concreto. Coutinho (1997), sugere a adoção da curva granulométrica teórica de Faury de maneira a atender este parâmetro. As composições granulométricas dos agregados, consumos de cimento e processos construtivos tem caracterizado às misturas e diferenciado às diversas aplicações dos concretos secos, (OLIVEIRA et al., 1995).

### 2.7.2 Vantagens e desvantagens do Concreto Compactado com Rolo-CCR

A maior vantagem do CCR sobre outros tipos de concreto, para aplicação em determinadas estruturas, é a possibilidade de redução e otimização do custo e do tempo de construção devido a mecanização do processo de lançamento do concreto (LACERDA et al., 2006).

O CCR possui várias vantagens devido a sua tecnologia que podem ser destacadas (PITTA, 1995):

- a) os pavimentos de CCR são uma tecnologia que envolve o uso de materiais convencionais e equipamentos de construção em uma aplicação não convencional, o resultado é uma economia de tempo na construção do pavimento, o que influencia significativamente os custos desta;
- b) o CCR pode ser fabricado em usinas de concreto convencional ou em usinas de solo-cimento, suas características mecânicas são semelhantes ao concreto convencional, embora seu método de fabricação seja completamente diferente;
- c) no caso de obras menores sujeitas a tráfego leve, o CCR pode ser executado com a maquinaria tradicional utilizada no movimento de terra (moto niveladora, rolo vibratório e rolo pneumático);
- d) no caso de obras maiores, onde o tráfego é médio a pesado, um bom acabamento superficial é necessário, o equipamento utilizado pode ser o comumente usado em obras de pavimentação de asfalto (vibro acabadora, rolo vibratório e rolo pneumático);
- e) alta capacidade de suporte inicial, permitindo que o pavimento seja liberado ao tráfego depois de terminado sua execução;
- f) em relação ao custo do CCR para pavimentos, em comparação com o concreto convencional, é unânime na bibliografia internacional que o CCR é da ordem de 15 a 20% mais econômico;
- g) elevada rigidez contribuindo para o não surgimento de deformações no revestimento asfáltico;
- h) possui alta resistência à tração na flexão se solicitados por carregamentos pesados e alta resistência à compressão, apresentando uma superfície mais durável, resistindo ao desgaste por abrasão.

Em relação às possíveis desvantagens apresentadas pelo CCR, são fundamentalmente:

- a) os equipamentos comumente usados são aqueles empregados na execução de compactação de solos, logo o acabamento superficial do CCR é difícil de se executar, então para atender as demandas da rodovias, para alguns casos, se faz necessário colocar uma camada fina de asfalto, na ordem de 3cm (PITTA, 1995);
- b) quando o acabamento do CCR que for funcionar como um revestimento não for adequado e/ou a cura deficiente, o CCR sofrerá um desgaste superficial acelerado que, se não for reparado, corretamente, continuará a deteriorar o pavimento;
- c) se a exigência de projeto é um alto grau de compactação para alcançar a resistência de projeto e não se dispõe de equipamentos adequados, se deverá efetuar uma grande quantidade de passadas com rolo vibratório e se a espessura é alta, se requer um rolo vibratório pesado(15 t) (PITTA, 1995);
- d) em algumas regiões são realizados trechos experimentais para se conhecer o comportamento do CCR, no que se refere ao espaçamento adequada as juntas transversais do pavimento, as vezes segue-se as recomendações internacionais (cada 10 a 15 metros). Em algumas regiões estas distâncias são menores e estas juntas deverão ser preenchidas para não ocorrer deterioração prematura no pavimento. Por fim, deve-se adaptar as distâncias das juntas a experiência local, por exemplo, de 6 a 8 metros (PITTA, 1995).

O fator mais importante para uma boa execução é o alto controle tecnológico pois seu comportamento é sensível a pequenas mudanças da massa específica aparente seca e teor de umidade ocasionando perda de resistência mecânica e de durabilidade.

### 2.7.3 Metodologia de dosagem do CCR

A metodologia de dosagem do concreto, independe se ele for seco ou plástico, mas visa obter uma composição mais econômica que compatibilize os materiais constituintes, com os equipamentos de execução no campo e as propriedades mecânicas exigentes de projeto.

Nos concretos plásticos, praticamente a pasta (cimento mais água) ocupa todos os espaços vazios existentes entre os agregados, tornando o volume de ar muito pequeno; por outro lado nos concretos secos, existe a presença de ar em volume significativo na mistura. Deste modo, o concreto seco não segue o princípio consagrado para concretos plásticos que é a necessidade de uma menor quantidade de água para elevação da resistência mecânica (TANGO, 1994).

A dosagem do CCR é geralmente executada pelo método do menor volume de vazios, ou seja, consiste em encontrar a melhor proporção entre os agregados de maneira a propiciar o menor volume de vazios possíveis entre os agregados componentes do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2014) existem duas abordagens principais para dosagem do CCR. A primeira utiliza os princípios da compactação do solo para produzir o CCR, pelo qual o teor de umidade de água produz o máximo peso específico aparente seco da mistura, ou seja, atinge o menor volume de vazios (menor porosidade). Esse método não faz uso do método convencional, que é de diminuir a relação água/cimento para maximizar a resistência mecânica do concreto. A segunda abordagem usa métodos de tecnologia tradicional do concreto para produzir CCR com alto teor de pastas - trabalhabilidade.

#### 2.7.3.1 Peso específico aparente seco e teor ótimo de compactação

São três energias que se utilizam na compactação de solos, segundo a NBR 7182/86:

- a) energia normal  $5,8 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$  ou  $0,59\text{J}/\text{cm}^3$ ;
- b) energia intermediária  $12,3 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$  ou  $1,27\text{J}/\text{cm}^3$ ;
- c) energia modificada  $26,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$  ou  $2,70\text{J}/\text{cm}^3$ .

Segundo Trichês (1993) e Hurtado Díaz (1993), as energias de compactação influenciam para um mesmo traço o peso específico aparente seco máximo do CCR. No entanto em seus trabalhos eles evidenciam que para consumos de cimentos menores que  $200\text{kg}/\text{m}^3$  a resistência média à compressão aos 28 dias de cura, cresce 22%, mudando da energia normal para intermediária e 40% variando da energia normal para modificada. Para consumos acima de  $200\text{kg}/\text{m}^3$ , a mudança de energia normal para intermediária ou modificada resultou num acréscimo de resistência de 10%.

Este método baseia-se no procedimento de compactação de solos que é uma relação entre o peso específico aparente seco em função do teor de umidade.

Primeiro determina-se a composição granulométrica dos agregados que melhor se encaixa na faixa granulométrica escolhida em porcentagens parciais dos agregados.

Para Andriolo (1989), a escolha e controle granulométrico dos agregados são fatores importantes que influenciam na qualidade e nas propriedades do CCR. Portanto, quanto à distribuição granulométrica para o CCR, três pontos merecem atenção: a escolha do diâmetro máximo, o teor aceitável de material pulverulento no agregado e a adição de finos.

Quanto a dimensão máxima característica do agregado ( $D_{m\acute{a}x}$ ), Jofre et al. (1989) comentam que na Espanha é recomendada à utilização de agregados com  $D_{m\acute{a}x}$  de 19 mm e na França, é preconizado  $D_{m\acute{a}x}$  de 14mm ou 16mm, conforme o tipo de rodovia, sendo que lá este parâmetro é estabelecido para diminuir a probabilidade de segregação do CCR e permitir um bom acabamento superficial (HURTADO DIAZ, 1993).

Para Nanni et al. (1996), o  $D_{m\acute{a}x}$  deve ser igual ou inferior a 22 mm, sendo que geralmente o valor mais utilizado é 19mm. Os autores recomendam que a porcentagem de agregados passando pela peneira de malha 0,075 mm (#200), deve estar compreendido entre 10% e 14%, acrescentando que a granulometria do CCR deve ser mais fina do que a do concreto simples para pavimentação. Na Figura 17 estão indicadas duas faixas granulométricas usadas no CCR,

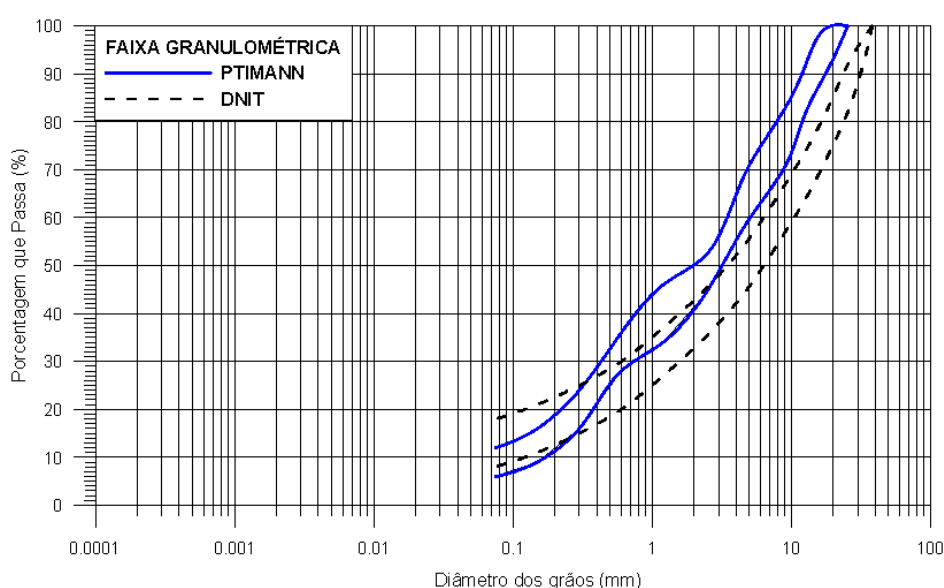


Figura 17 - Faixas granulométricas do CCR.

Fonte: PITTMAN(1998), DNIT(056/2013-ES)



Na continuação, fixa-se o consumo de cimento e finalizando, realiza-se o ensaio de compactação para determinação do peso específico aparente seco máximo e umidade ótima. Na Figura 18 é mostrado a curva de compactação do concreto convencional utilizado nesta pesquisa, para consumo de cimento de  $120\text{kg/m}^3$ .

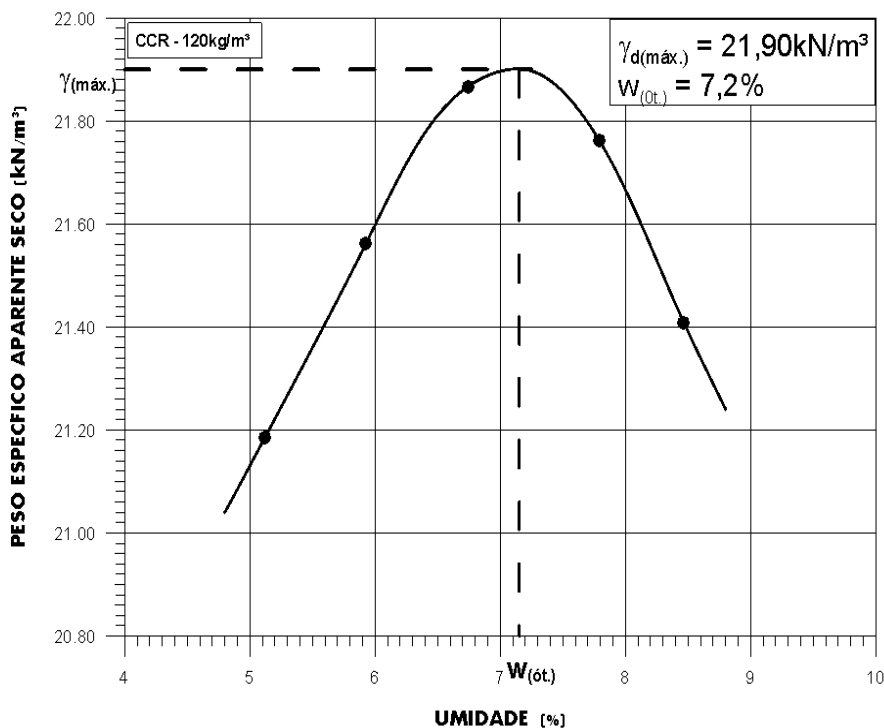


Figura 18 - Curva de compactação do CCR para consumo de cimento de  $120\text{kg/m}^3$ .

Fonte: Autor (2017)

### 2.7.3.2 Trabalhabilidade

Abreu (2002) explica que se entende por trabalhabilidade do concreto seco, como “a facilidade de se produzir, transportar e aplicar o concreto com o auxílio do equipamento apropriado, com a mínima perda de homogeneidade e mantendo-se intactas as características de aspecto visual, forma e coesão do produto recém adensado, além de aceitáveis níveis de produtividade”. Vale ressaltar que esta propriedade não é facilmente parametrizada como, no concreto plástico, pela medida de consistência pelo abatimento do tronco de cone (slump test).

A trabalhabilidade indica a consistência do concreto e diz respeito a sua facilidade de espalhamento e compactação. No CCR, a trabalhabilidade pode ser determinada através do ensaio Cannon Time que é determinado medindo o tempo para consolidar um determinado volume de CCR segundo energias específicas. Como o CCR é um concreto de consistência seca, o ensaio de Slump não deve ser aplicável. O CCR com excessiva trabalhabilidade indica

que há muita pasta ou excesso de água na mistura, afetando as propriedades finais do concreto, operações de espalhamento e compactação além de reduzir as propriedades mecânicas e a durabilidade do pavimento. A baixa trabalhabilidade (mistura seca) do CCR acontece quando o teor de água não é o suficiente para preencher os vazios entre as partículas dos agregados. Com o aumento de vazios, reduz as propriedades mecânicas e a durabilidade do revestimento.

Andriolo & Sgarboza (1993), explicam que a trabalhabilidade do CCR, não pode ser medida através do método usual de abatimento do tronco de cone, pois o mesmo não possui trabalhabilidade, e o adensamento através de vibradores de imersão não é adequado para concreto com slump zero quanto ao controle e quanto à determinação do teor de ar incorporado.

Paulon et al. (2004) comentam que o tempo de “Cannon Time” é diretamente influenciado pela água da mistura e pela quantidade de finos adequada ao preenchimento dos vazios. Em laboratório procura-se, para cada mistura, desenvolver uma correlação entre os resultados dos ensaios e a trabalhabilidade necessária à compactação adotada no campo. Neste caso, a trabalhabilidade é representada pela possibilidade de espalhamento e de passagem do rolo, bem como pela capacidade de se obter a compactação que minimize os vazios.

Conforme os autores, os tempos correspondentes para ensaios de consistência, adotados como referência nos estudos de dosagens de CCR para pavimentação é mostrada na Tabela 12.

Tabela 12 - Tempos correspondentes para ensaio de consistência.

ENSAIO	EM LABORATÓRIO	NA OBRA
TEMPO DE VIBRAÇÃO (s)	19 ± 2	16 ± 2

Fonte: Paulon et al. (2004)

Para determinação da consistência do CCR é utilizado o aparelho Vebe modificado com mesa vibratória, sendo o adensamento auxiliado por um contrapeso adicional colocado sobre a mistura, Figura 19.

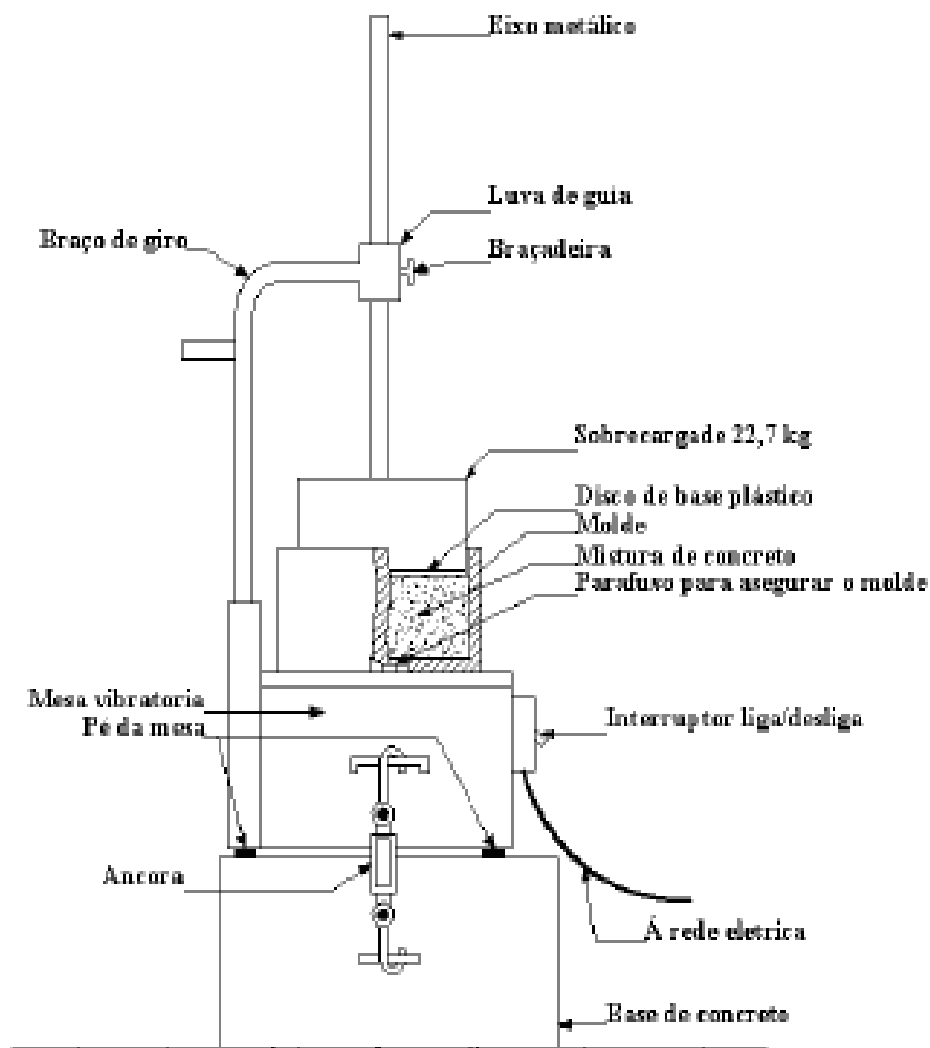


Figura 19 - Mesa vibratória VEBE para medir a consistência do CCR, teste método A (ASTM C 1170/C 1170M:2014)  
 Fonte: Paulon et al. (2004)

#### 2.7.4 Materiais

Quanto à produção do CCR, os principais materiais utilizados são os mesmos empregados no concreto convencional, ou seja, agregados graúdos, agregados miúdos, cimento Portland, água e aditivos, quando houver necessidade de seu emprego.

A resistência do CCR depende principalmente da qualidade dos agregados, do grau de compactação, das proporções de cimento, material pozolânico, água e adições (ANDRIOLO, 1989).

#### 2.7.4.1 Agregados

Os agregados constituem até 85% do volume da mistura de concreto compactado com rolo e desempenham um papel influente na capacidade de trabalhabilidade, massa específica aparente seca, resistência e durabilidade da mistura. O CCR compactado com rolo difere do concreto convencional em seus requisitos de graduação. Esta graduação diferente vem da necessidade de o esqueleto de agregado do CCR, ser consolidado sob esforços de compactação do cilindro de aço e rolo pneumático. A graduação de agregados finos e grosseiros deve ser selecionada para assegurar a viabilidade, compactação e acabamento superficial.

A seleção de agregados adequados e a graduação do agregado para pavimentos de concreto compactado com rolos reduz o potencial de segregação e melhora a resistência e durabilidade do pavimento. A seleção de agregados também afetará a quantidade de água e cimento.

As práticas de seleção e mistura de agregados podem variar de acordo com as práticas locais, as especificações de construção, a severidade da exposição e a disponibilidade de diferentes tamanhos.

Abreu (2002) ressalta que, em princípio, não há restrições quanto ao uso deste material na produção do CCR, desde que atendam as condições especificadas por norma como, por exemplo, a granulometria, ausência de matéria orgânica e contaminação de torrões de argila nos agregados miúdos.

Para a American Road & Transportation Builders Association – ARTBA (2003), os agregados podem ser convencionais, como pedra britada ou areia, e ainda outros materiais não convencionais como escória de alto forno, materiais reciclados de pavimentos e cinza pesada.

Andriolo & Sgarboza (1993) comentam que os agregados utilizados no concreto devem possuir três funções principais:

- a) servir como um enchimento relativamente barato para o material aglomerante;
- b) formar uma estrutura de partículas que seja adequada para resistir a ação das cargas aplicadas, à abrasão, à percolação da água e a ação do tempo; e,

- c) reduzir as variações de volume resultantes do processo de pega e endurecimento e da variação de umidade na pasta de água e cimento.

A norma NBR 9935/2011, que define os termos relativos a agregados em concreto de cimento Portland, adota como agregado graúdo todo material granular com pelo menos 95% em massa, dos grãos retido na peneira de # 4,8 mm (nº. 4) e agregado miúdo aquele com pelo menos 95 % em massa que passa pela peneira de # 4,8 mm (nº. 4).

O agregado graúdo pode ser britada ou não britada, concreto reciclado, ou uma combinação destes. O tamanho nominal máximo do agregado normalmente não deve exceder os 19 mm particularmente se a textura do pavimento é importante (USACE, 1995). Limitar o tamanho máximo nominal a 19 mm, ou menos, e utilizar granulometrias contínuas usualmente resulta numa menor segregação do agregado graúdo na mistura (IECA, 1996).

Entretanto, misturas com granulometrias mais grossas requerem uma menor quantidade de água de amassamento, favorecendo assim o comportamento quanto à retração, estas granulometrias têm também um melhor comportamento à fadiga devido a que uma maior quantidade de energia é necessária para que a trinca se propague desde a face inferior contornando os agregados (TRICHÊS, 1993).

O agregado miúdo pode ser areia natural, areia industrial ou uma combinação de ambas. Areias com altas quantidades de partículas siltosas não plásticas podem trazer benefícios devido ao fato de atuarem como *filler* mineral e ajudarem na redução da quantidade de cimento requerida. Entretanto, misturas que contenham agregados finos com excessiva quantidade de argila podem necessitar de um maior volume de água resultando em trincamentos, fraturas e redução da resistência (USACE, 1995).

As propriedades inerentes aos agregados afetam em grande escala propriedades mecânicas do concreto, tais como, a resistência à compressão ou flexão, o módulo de elasticidade, a durabilidade, entre outros (DEL CARPIO, 2009).

#### 1 - Agregado graúdo

Comparado ao CCR contendo agregados naturais de forma arredondadas (seixo), o agregado de forma irregular requer mais água para obter uma consistência dada e mais esforço para

compactar. No entanto, é mais estável durante a compactação e geralmente proporciona uma maior resistência à flexão (ACI, 1995).

Devido ao baixo teor de água, o risco de segregação do CCR é alto. A fim de minimizar a segregação durante o manuseio e colocação do CCR e fornecer uma base fechada e relativamente textura de superfície lisa, o tamanho máximo agregado é geralmente limitado a aproximadamente 19mm (MARCHAND et al., 1997; ACI, 1995; PALMER, 1987). Para construção de várias camadas, agregado com um tamanho máximo de 40 mm (1 ½ polegada) pode ser usado para a primeira camada (isto é, camada inferior) (CPCA, 1997).

## 2 – Agregado fino

As misturas de CCR são menos suscetíveis à segregação durante o manuseio e colocação quando o conteúdo de agregados finos é aumentado em relação ao recomendado para misturas de concreto convencionais (CPCA, 1997; ACI, 2000; DEPARTAMENTOS DOS EUA DO EXÉRCITO E DA FORÇA AÉREA, 1987). A fim de melhorar a superfície superior do CCR e para obter uma superfície fechada, recomenda-se que os finos não plásticos passando por uma peneira de 75 µm (Nº. 200) estejam na faixa de 5 a 10% (MARCHAND, et al. 1997; PALMER, 1987); O Comitê ACI 325 (ACI, 2000) recomenda conteúdos finais de fins na faixa de 2 a 8%.

Um aumento na quantidade da fração fina leva à adição de mais água para manter a consistência concreta dentro de uma trabalhabilidade viável. Foi relatado que o aumento da quantidade de água não afetou significativamente a resistência à compressão em materiais com teor de cimento constante, Chun apud (SCHWEIZER; RABA, 2008). Parece que, independentemente dos materiais do teor de cimento, a resistência mecânica do CCR, aumenta com a quantidade de finos nas misturas (MARCHAND et al., 1997), por causa da relação muito baixa de *água:cimento* e alta compactação alcançada.

Resultados indicam quando se usam agregados finos alternativos no CCR (argilas, areia de dunas, silte), quando comparados com agregados finos padrões, exige-se alto teor de cimento para alcançar resistência equivalente (CHUN apud SCHWEIZER; RABA, 2008).

#### 2.7.4.2 Cimento

O CCR pode ser produzido com qualquer tipo de cimento, mas o tipo de cimento utilizado tem um efeito significativo sobre as taxa de hidratação e desenvolvimento de resistência do CCR, e portanto, é recomendado a escolha de cimentos com baixo calor de hidratação (HURTADO DIAZ, 1993; PITTA; DIAZ, 1995).

Alguns autores consideram o teor de cimento para CCR utilizados como bases de pavimentos rígidos flexíveis de 80 até 160 kg/m<sup>3</sup> e para os revestimentos, consumos que variam entre os 260 até 380 kg/m<sup>3</sup> (PITTA, 1994).

O teor de cimento para uma mistura típica da mistura de CCR é cerca de 11% do concreto em massa (ACI, 1996). A quantidade de cinzas volantes é geralmente cerca de 20 a 30%, em relação a massa total da mistura para pavimento típicos de rodovias. A cinza volante no CCR é usada parcialmente em substituição ao cimento Portland e otimiza a quantidade de finos na mistura (CHUN, 2000). A cinza volante melhora as características físicas e contribui para o desenvolvimento da resistência devido suas propriedades pozolânicas (NAIK; RAMMER, 1989).

Quando usado para substituir uma porção de cimento, as cinzas volantes geralmente diminuem a quantidade de água na mistura de concreto com uma consistência mensurável. As cinzas volantes também podem ser usadas como enchimento mineral em misturas de baixo volume de pasta para aumentar a capacidade de trabalho e a densidade do CCR (ACI, 2000).

Alto teores de finos no CCR aumenta a resistência mecânica. Para aumentar a quantidades de finos, pode ser usada a cinza volante parcialmente em substituição a areia (MARCHAND et al., 1997).

A substituição parcial, no máximo 25% do cimento Portland por cinza volante oferece os seguintes benefícios (MATERIJALA, 2015):

- a) custo de instalação e ciclo de vida inferior em relação ao pavimento convencional;
- b) proporciona alta resistência e maior durabilidade ao longo do tempo;
- c) melhora a trabalhabilidade devido a estrutura esférica da cinza volante;

- d) reduz significativamente a reação álcali-agregado prevenindo fissuras;
- e) reduz o calor de hidratação (60%) prevenindo fissuras térmicas;
- f) o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é gerado na produção de cimento Portland. Se há diminuição do emprego deste cimento, cada uma tonelada de redução de fabricação deste há diminuição de uma tonelada de dióxido de carbono que não será jogado na atmosfera.

#### 2.7.4.3 Água

A melhor porcentagem de água dentro de um metro cúbico de CCR varia entre 4 e 7% do peso dos materiais secos, sendo necessários, na maioria dos casos, de 110 a 130 litros/m<sup>3</sup> de água, ou seja, aproximadamente 70% da água que normalmente utiliza-se para fabricar um concreto comum (mais ou menos 190 litros/m<sup>3</sup>) (PITTA, 1994).

O CCR é muito sensível à variação do conteúdo da água. A falta de água aumenta o risco de segregação, dificultando a compactação e o acabamento superficial. Já o excesso produz falta de estabilidade da mistura durante a compactação. Tanto a falta como o excesso de água produzem diminuição da resistência mecânica do CCR (PITTA, 1994).

#### 2.7.4.4 Aditivos

A maioria dos aditivos químicos utilizados para a produção do concreto convencional podem ser utilizados para produzir o CCR. Contudo, as quantidades de dosagem para misturas de CCR não são as mesmas que as dos concretos convencionais. Os efeitos dos aditivos são reduzidos porque o CCR possui pouca água e tempos menores de mistura. Em consequência, as dosagens de aditivos devem ser incrementadas para atingir a efetividade. A pequena quantidade de íons clorídricos na solução dos aditivos químicos não é um problema em decorrência do fato de que os pavimentos de CCR não têm armadura. Porém, devem ser tomados alguns cuidados com alguns aditivos que podem acelerar ou retardar os tempos de espalhamento e compactação (ACRGTQ, 2001).

Pitta e Díaz (1995) comentam que o CCR é muito sensível às variações de água do que os outros concretos convencionais e que a falta de água possibilita a segregação, prejudicando a compactação e o acabamento, enquanto que o excesso de água pode promover a exsudação da mistura durante a compactação. Torna-se muito importante a compactação do CCR na



umidade ótima, pois a falta quanto o excesso de água diminuem a resistência mecânica do material.

### 2.7.5 Propriedades do CCR endurecido

As propriedades do concreto endurecido são caracterizadas pela qualidade dos agregados, pela relação água/cimento da mistura, ou no caso do CCR, pela compactação feita de acordo com a umidade ótima. A seleção desse material construtivo deve ser elaborado de modo a levar em conta sua capacidade de suportar forças/tensões aplicadas. A resistência do concreto é a propriedade mais valorizada pelos engenheiros e projetistas sendo o nível de porosidade encontrada na matriz um fator intimamente ligado a resistência do concreto.

Na matriz de concreto, a porosidade pode ser um fator limitante para a resistência mecânica. A porosidade da pasta de cimento da matriz e a zona de interface entre a matriz e o agregado gráúdo normalmente determina a resistência característica do concreto de densidade normal. De uma forma geral, a resposta do concreto as tensões aplicadas não dependem somente do tipo de esforço, mas também da combinação de vários fatores que afetam a porosidade dos diferentes componentes da matriz de concreto. Pode-se citar como fatores as propriedades e proporções de materiais no traço elaborado, o grau de compactação e as condições de cura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A resistência e as propriedades elásticas do CCR variam dependendo dos componentes da mistura e proporções de mistura da mesma maneira que para concreto convencional. A qualidade dos agregados e o teor de cimento são os principais fatores que afetam a resistência e as propriedades elásticas.. Propriedades do CCR endurecido incluem os resultados da resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, razão de Poisson e peso específico aparente seco (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2000).

Tendo em vista a diversidade de condições construtivas e a importância relativa das estruturas em CCR destinado para camada de base de pavimentos rodoviários, Balbo (2002) recomenda alguns valores típicos para as propriedades do CCR no estado endurecido como está indicado na Tabela 13.

Tabela 13 - Propriedade mecânicas típica do CCR como base.

Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão simples (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Módulo de deformação (GPa)
80	5 a 7	0,6 a 1,0	7,4 a 12,6
120	10 a 15	1,2 a 2,2	17,1 a 21,9
160	16 a 23	2,0 a 2,8	20,6 a 24,0

Fonte: Balbo (2002)

O CCR composto para pavimentos tem parâmetros mecânicos que variam fundamentalmente, de acordo com o consumo de ligante hidráulico, quantidade de água, características dos materiais, métodos e energias de compactação empregada, utilização de aditivos, idade de cura, entre outros. A Tabela 14 indica os principais fatores que afetam os parâmetros mecânicos do CCR (PITTA, 1991).

Tabela 14 - Fatores que afetam as propriedades do CCR endurecido.

Propriedades	Fatores											
	Cimento	Tipo de Cimento	Umidade	Energia de Compactação	Granulometria	Tipo de Agregado	Aditivo	Temperatura de Cura	Tempo de Cura	Tratamento Superficial.		
Resistência à Compressão	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Resistência à tração na Flexão	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Módulo de Elasticidade	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Retração por Secagem	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Durabilidade	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Permeabilidade	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Fonte: Pitta (1991)

#### 2.7.5.1 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão é normalmente requerida porque é relativamente fácil de determinar. A otimização dos constituintes secos das misturas de CCR possibilitam atingir altos valores de resistência à compressão utilizando baixos teores de cimento. A redução da porosidade do esqueleto mineral leva a uma menor exigência de pasta para preencher os vazios entre os agregados. Como resultado do alto grau de compactação, uma mistura de CCR requer menos material cimentante comparada a quantidade normalmente utilizada para

fabricar um concreto convencional de igual resistência à compressão (GAUTHIER et al., 2000).

A massa específica aparente seca influencia a resistência à compressão do concreto dependendo da faixa de consumo de cimento na qual se esteja trabalhando. Para baixos consumos de cimento ( $< 200 \text{ kg/m}^3$ ) 1% na variação da massa específica aparente seca representa cerca de 11% na variação da resistência à compressão. Para consumos mais elevados ( $> 260 \text{ kg/m}^3$ ), 1% de variação na massa específica aparente seca representa 4,5% na variação da resistência à compressão (TRICHÊS, 1993).

O ensaio de compressão simples para aplicação em pavimento não é um dos principais fatores para avaliação das propriedades mecânicas, devido aos esforços principais na estrutura da camada de pavimento serem à tração na flexão (na fibra inferior), em pavimentação os concretos são normalmente especificados com base em sua resistência à tração quando não armados.

Para avaliar as propriedades mecânicas para aplicação em pavimento, a resistência à compressão é utilizada como um indicador de outras propriedades, como por exemplo, resistência diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, etc. A resistência à compressão pode ser medida durante a construção para monitorar a variabilidade da mistura e confirmar as outras propriedades de projeto. A resistência à compressão é principalmente afetada pelo teor de material cimentício, tipo de cimento, qualidade e classificação dos agregados, granulometria e grau de compactação. Para mistura de CCR bem compactadas, essas influências são semelhantes ao concreto convencional e para misturas mal compactadas ou com pastas suficientes para preencher todos os vazios, o grau de compactação geralmente controlará o nível de resistência à compressão alcançado. A maioria dos CCR de projeto usam misturas que produzem uma resistência à compressão média entre 13,8 e 20,7 MPa, com idades de 90 dias a 1 ano, respectivamente (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2000).

#### 2.7.5.2 Resistência à tração

A resistência à tração depende de vários fatores, principalmente da aderência dos grãos dos agregados com a argamassa (ALMEIDA, 2002).

A resistência à tração pode ser medida por vários métodos (tensão direta, compressão diametral e resistência à tração na flexão). Todos estes testes dependem da taxa de carga aplicada no ensaio, da idade de cura e teor de umidade dos corpos de prova. Além disso os resultados destes ensaios, também dependem do teor de cimento, da resistência do agregado, características da ligação do agregado com a pasta de cimento e do grau de compactação da mistura. A resistência à tração é mais dependente do vínculo do agregado com a pasta de cimento do que a resistência à compressão, portanto a relação entre a resistência à tração e a compressão não varia apenas com o tipo de método da resistência à tração, mas também varia com o tipo e tamanho do agregado. A relação da resistência à tração e à compressão no CCR é de interesse para o projeto, especialmente em estruturas menores, onde pode não ser realizado ensaio de resistência à tração que para o CCR varia entre 5 a 10%, em relação à compressão simples, dependendo da qualidade do agregado, grau de compactação, tempo de cura e tipo de método de ensaio à tração (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2000).

Para o estudo da tração são aplicados, principalmente três tipos de ensaios: tração direta, compressão diametral e tração na flexão.

#### 2.7.5.2.1 Ensaio de tração direta ou ensaio de tração axial

Segundo Mehta e Monteiro (2008) o ensaio de tração direta ou axial do concreto raramente são aplicados, principalmente porque os dispositivos de fixação dos corpos-de-prova introduzem tensões secundárias que não podem ser ignoradas.

Os resultados são muito influenciados pela forma de se proceder à tração na máquina de ensaio. De acordo com Neville (1997) é muito difícil a aplicação de uma força de tração pura sem excentricidade. Não obstante alguns bons resultados obtidos com certos tipos de pinças, é difícil evitar tensões secundárias como as induzidas pelas pinças ou por pinos embutidos.

#### 2.7.5.2.2 Ensaio de compressão diametral

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a resistência à compressão diametral é um índice adequado para os diversos tipos de resistências, sendo assim, uma relação direta deve existir entre as resistências de compressão, tração ou flexão de um concreto específico, porém nem sempre se aplica esta aproximação, mesmo sendo válida.

Assim se faz necessário conhecer as características dos concretos também pela resistência à tração indireta (resistência à tração por compressão diametral), através do ensaio, que em mecânica dos solos é conhecido como “ensaio brasileiro”, que foi desenvolvido pelo Professor Fernando Luiz Lobo Carneiro, em 1943 (I.N.T., 2005), Figura 20, sendo a resistência à compressão diametral determinada pela equação 1.

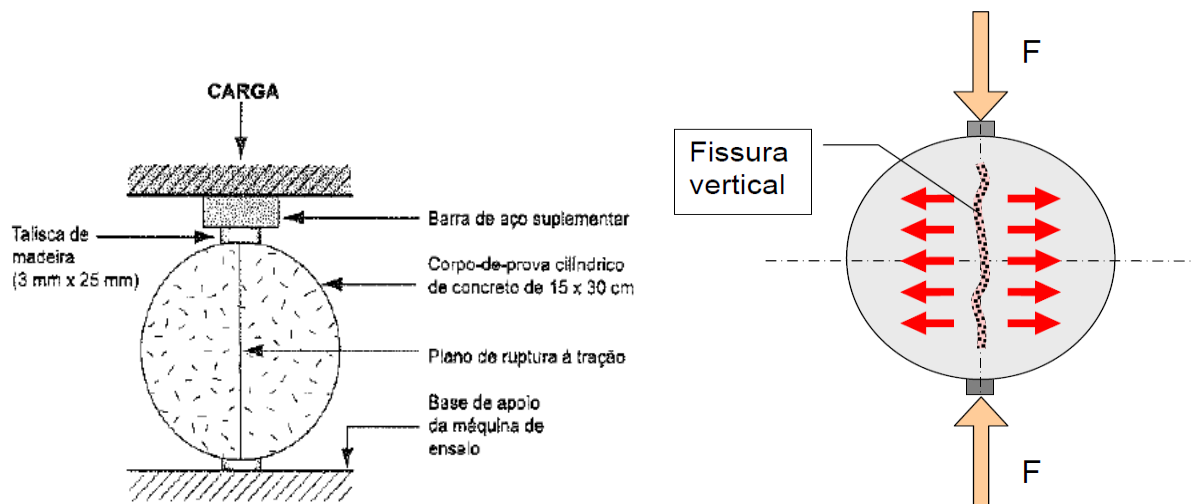


Figura 20 - Esquema do ensaio e representação do rompimento por resistência à tração por compressão diametral  
Fonte: I.N.T. (2005)

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{\pi.d.L} \quad (1)$$

onde:

$f_{t,D}$  = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = Carga de ruptura (N);

d = Diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L = Altura do corpo-de-prova (mm)

#### 2.7.5.2.3 Resistência à tração na flexão.

A resistência à tração na flexão (módulo de ruptura) é um dos parâmetros mais importantes nos dimensionamentos dos pavimentos de concreto tanto convencional quanto de CCR. O critério da fadiga é influenciado pela resistência à flexão do concreto. Esta resistência do CCR é maior que a do concreto convencional. Ela se deve à massa específica da mistura na qual os agregados estão em contato um com outro. Este fato dificulta a propagação das fissuras e para que o trincamento aconteça é preciso uma maior quantidade de energia (ACRGTQ, 2001).

Adicionalmente, a relação entre o módulo de ruptura do concreto convencional e a resistência à compressão é geralmente considerado de 10%, mas no CCR esta relação muda para 12% ou até 15%, (ACRGTQ, 2001; TRICHÊS, 1993).

A massa específica aparente seca influencia a resistência à tração na flexão do concreto dependendo da faixa de consumo de cimento na qual se esteja trabalhando. Para baixos consumos de cimento ( $< 200 \text{ kg/m}^3$ ), 1% na variação da massa específica aparente seca representa cerca de 4,5% na variação da resistência à flexão. Para consumos mais elevados ( $> 260 \text{ kg/m}^3$ ), 1% de variação na massa específica aparente seca representa cerca de 2,9% na variação da resistência à flexão (TRICHÊS, 1993).

Para Mehta e Monteiro (2008), a resistência de um material é definida como a capacidade para resistir à tensão sem se romper. Na pavimentação, as estruturas de concreto têm sua resistência intimamente ligadas com a formação de fissuras, que é proveniente das tensões de tração na flexão, promovidas pelos esforços repetidos que acabam superando a resistência à fadiga e ocasionam a ruptura. Estas tensões provocam as fissuras na estrutura de um pavimento de concreto, o que promove os mais diversos processos de deterioração na vida útil do mesmo. No Brasil é ensaiado pela norma brasileira NBR 12142/2010, conforme esquema de ensaio apresentado na Figura 21 (MEHTA, 2014).

Este método consiste em romper corpos de prova prismáticos moldados de acordo com a norma NBR 5738 (2008). Ele consiste basicamente em aplicar duas cargas linearmente distribuídas nos terços médios de um prisma ou uma força concentrada no meio do vão da seção de modo a provocar tração na face inferior do C.P. Esta face terá suas fibras tracionadas até a ruptura do concreto. Devido à forma de aplicação da carga de ruptura do elemento de concreto, o terço central da peça fica sob ação de flexão pura, não havendo efeitos de esforços cortantes como pode ser observado através de diagrama de esforços solicitantes na Figura 22 (MAGALHÃES, 2009).

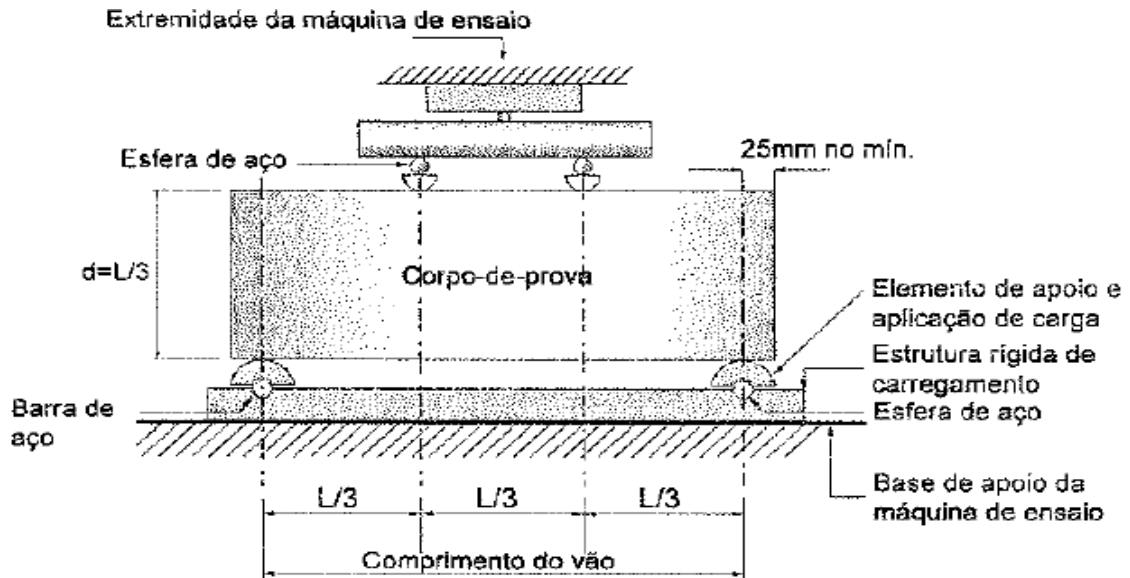


Figura 21 - Esquema de ensaio da resistência à tração na flexão, dois cutelos.

Fonte: Mehta (2014).

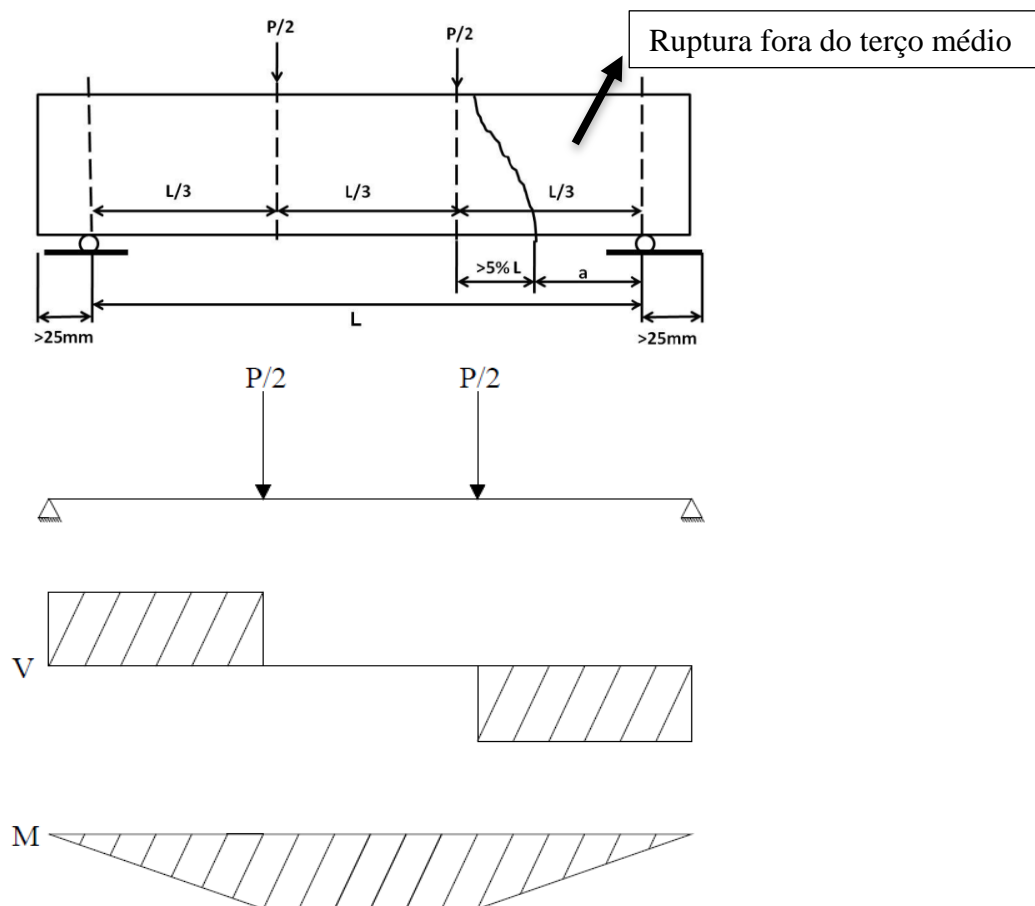


Figura 22 - Caso de ruptura no terço médio ou fora deste e diagrama dos esforços solicitantes no terço médio, dois cutelos.

Fonte: Magalhães (2009)

A resistência à tração do concreto é da ordem de 10% da resistência à compressão. A razão desta grande diferença entre a resistência à tração e à compressão é atribuída à estrutura heterogênea e complexa do concreto (KATAOKA, 2007).

Uma seção do corpo-de-prova alcança sua tensão máxima quando a região entre as duas forças aplicadas fica sujeita a um momento fletor máximo e as seções se apresentam com esforços cortantes quase nulos, tendo em vista que essas forças cortantes, de pequena intensidade, apenas atuam pela ação do peso próprio do corpo-de-prova.

Com a ruptura ocorrendo na seção transversal entre as forças concentradas (2 cutelos) aplicadas, a resistência à tração na flexão, pode ser determinada a partir da Equação 2. Se a ruptura ocorre na seção transversal entre o plano de aplicação de uma das forças e o plano que contém a seção de um dos apoios, a resistência à tração na flexão é determinada pela Equação 3.

$$f_{ct,f} = \frac{FL}{bd^2} \quad (2)$$

$$f_{ct,f} = \frac{3Fa}{bd^2} \quad (3)$$

onde:

$f_{ct,f}$  = resistência à tração, (MPa);

F = carga de ruptura, (kN);

L = comprimento do vão, (mm);

b = largura média do corpo-de-prova, (mm);

d = altura média do corpo-de-prova, (mm);

a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, (mm).

Para a realização deste ensaio, no Brasil, adotam-se como padrão amostras prismáticas com as dimensões de 150x150x500 mm, mas também é aceito amostras em dimensões menores com 100x100x400 mm, o que facilita a realização deste ensaio, com uma redução significativa de material e carga de ruptura.



Os estudos de Cervo (2004) verificaram a possibilidade de reduzir as dimensões dos corpos-de-prova prismático para o ensaio de tração na flexão, tendo em vista todas as dificuldades que os corpos-de-prova com as dimensões recomendadas por normas (150x150x500 mm) ocasionam para execução deste ensaio.

Segundo Cervo et al. (2004), o peso da amostra e as suas elevadas dimensões causam problemas no manuseio do corpo-de-prova, no posicionamento correto da peça para o ensaio de tração na flexão, no elevado nível de carga que deve ser imposto sobre o corpo-de-prova para chegar à ruptura e nos custos envolvidos no ensaio, que tendem ser mais elevados quanto maiores forem às dimensões das peças ensaiadas. Com a redução da dimensão do corpo-de-prova prismático para 100x100x400 mm, o ensaio torna-se mais fácil na sua execução.

O ensaio de resistência à tração na flexão pode ser aplicado em apenas um cutelo superior, disposto no meio do vão da vigota e apoiado a dois cutelos inferiores, dispostos a cada 20 mm da borda vertical do corpo-de-prova, Figura 23. O ensaio de um cutelo se mostrou mais adequado pelo fato da superfície de ruptura ser melhor definida (momento fletor máximo), garantindo a leitura de deformação e deslocamento máximo nos corpos de prova nas posições dos instrumentos (PINTO, 2010).

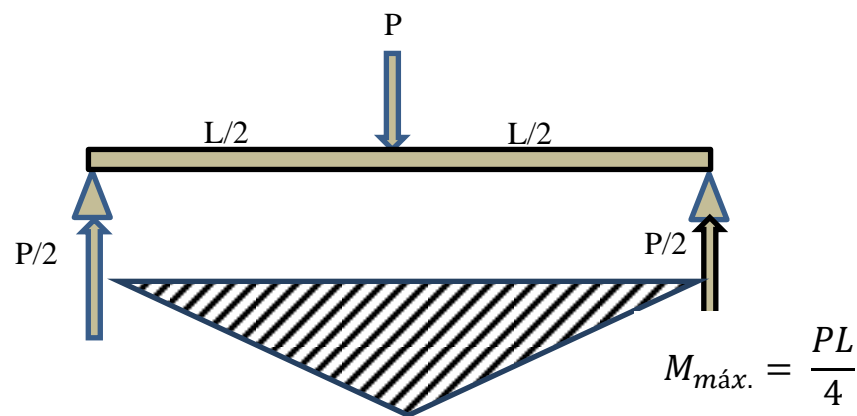


Figura 23 - Diagrama dos esforços solicitantes no terço médio, um cutelo

Fonte: Pinto (2010)

Para o ensaio de um cutelo pode-se empregar-se a Equação 4, (PINTO, 2010):

$$f_{ct,f} = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (4)$$

A resistência à tração na flexão está diretamente relacionada com a massa específica aparente seca e a resistência à compressão da mistura do concreto. Devido a dificuldade de se obter resultados de resistência à tração, principalmente em campo, há uma relação entre as resistências à tração e a compressão no CCR similar ao concreto convencional e pode ser representada pela Equação 5 (GUIDE FOR ROLLER - COMPACTED CONCRETE PAVEMENTS, 2010).

$$f_r = C \cdot \sqrt{f_c} \quad (5)$$

onde:

$f_r$  = Resistência à tração na flexão (MPa);

$f_c$  = Resistência à compressão (MPa);

$C$  = Fator constante é 7,5 para concreto convencional vibrado. Devido a massa específica da pasta no CCR e a resistência de sua ligação com as partículas do agregado, o valor da constante é usualmente maior do que o concreto convencional. Os valores recomendados estão entre 9 e 11 dependendo da mistura (ACI 325, 2010).

### 2.7.5.3 Módulo de elasticidade estático

O módulo de elasticidade é definido como a relação entre a tensão normal e a deformação correspondente abaixo do limite proporcional. Para fins práticos, apenas a deformação que ocorre durante o carregamento na fase elástica, neste limite, é considerada no cálculo do módulo de elasticidade de carga normal (também chamado de módulo "estático" ou "instantâneo"). A tensão subsequente devido ao carregamento na fase plástica é referida como *creep*. O CCR fornece um módulo de elasticidade igual ou maior do que o concreto convencional de igual resistência à compressão feita com similar materiais. O módulo de elasticidade depende do tempo de cura, resistência à compressão e tipo do agregado. Três métodos de medida do módulo é vista na literatura (cordal, secante e tangente). Para modelar a dependência do tempo do módulo de elasticidade, os testes devem abranger as idades de teste de 1, 3, 7, 28, 90, 180 e possivelmente 365 dias (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2000).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) o módulo de elasticidade do concreto pode ser descrito como a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite

proporcional adotado, e é dado pela declividade da curva tensão-deformação sob carregamento uniaxial. Devido à não linearidade da curva tensão-deformação do concreto, são definidos pelo menos três tipos de módulos de elasticidade, resumidos por Helene (1998) e Mehta e Monteiro (2014):

- a) módulo tangente é definido através de uma linha traçada de forma tangente à curva de tensão-deformação em qualquer ponto da curva, ou seja, é o coeficiente angular da reta tangente a qualquer ponto da curva tensão-deformação de compressão. Quando a reta sai da origem é denominado módulo tangente inicial ( $E_{ci}$ ), Figura 24;
- b) módulo secante é obtido através da declividade de uma linha traçada da origem até o ponto de curvatura que corresponde à tensão de 30% da carga de ruptura. Porém, Shehata (2005), afirma que nem sempre isso acontece, pois quando não é mencionada a tensão, infere-se que o módulo secante ( $E_{cs}$ ) seja relativo a uma tensão variando entre 40 e 50% da resistência à compressão, Figura 24;
- c) módulo cordal é obtido pela inclinação de uma linha pertencente a dois pontos da curva tensão-deformação. A diferença entre o módulo cordal e o secante é que ao invés de partir da origem, a linha é traçada de um ponto representando a deformação longitudinal de  $50\mu\text{m}/\text{m}$  até o ponto correspondente a 30% da carga última, no intuito de corrigir uma leve concavidade voltada para cima que aparece no início da curva, Figura 24.

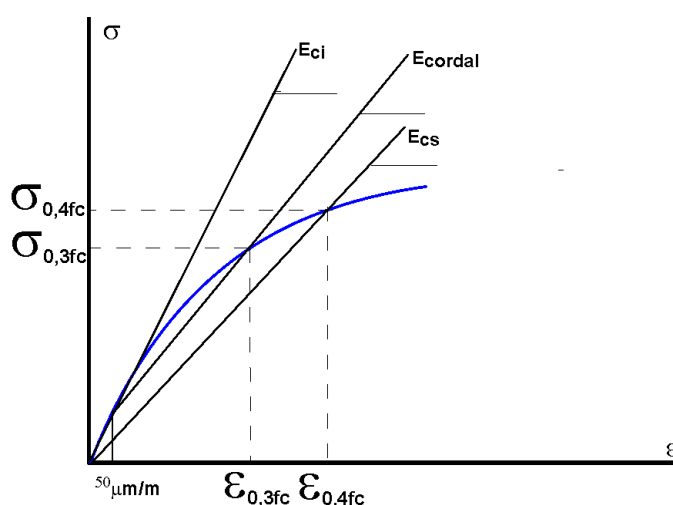


Figura 24 - Tipos de módulo de elasticidade.  
Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Sendo o concreto um material heterogêneo e composto por mais de uma fase, o módulo de elasticidade do concreto é determinado principalmente pela fração volumétrica, densidade e módulo dos agregados e da matriz da pasta de cimento, e ainda pelas características da zona de transição da interface pasta e agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além disso, o módulo de elasticidade do concreto também é influenciado por parâmetros de ensaio, como a umidade (NEVILLE, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014) e dimensões (MARTINS, 2008) dos corpos de prova e o tipo de medidor de deformação (ARAÚJO et. al., 2012).

Os principais fatores que podem afetar o módulo de elasticidade do CCR são:

- a) idade dos ensaios: o módulo de elasticidade se incrementa com a idade até um valor correspondente ao máximo que pode ser alcançado pela pasta ou pelo agregado (aquele que seja o menor);
- b) tipo de agregado (módulo): nas maiores idades, o módulo de elasticidade do CCR poderia ser similar ao módulo do agregado sempre que uma pasta rica seja utilizada; e
- c) relação água/cimento (ou proporção de pasta): Ou seja, misturas ricas terão altos valores de módulo de elasticidade e misturas pobres terão baixos valores (ANDRIOLO, 1989).

No caso do CCR, um módulo baixo é desejado com o intuito de diminuir o potencial trincamento.

Apesar das propriedades dos agregados não influenciarem significativamente a resistência à compressão, no módulo de elasticidade, os agregados têm significativa influência que advém do módulo de elasticidade do próprio agregado e de sua proporção volumétrica no concreto (NEVILLE, 2013).

Agregados densos têm um alto módulo de elasticidade e para agregados com módulo maior do que a pasta de cimento (maioria dos casos), quanto maior a quantidade em uma mistura de concreto, maior será o módulo de elasticidade do concreto (NEVILLE, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Isso fica claro nos estudos de Melo Neto e Helene (2002) que acharam

que, para uma relação água/cimento constante, um aumento no volume de agregados resultou em um aumento do módulo de elasticidade do concreto (Figura 25), e Alhadadas (2008) que dosou um mesmo traço de concreto variando apenas a natureza do agregado e encontrou diferentes valores de módulo de elasticidade, conforme Tabela 15.

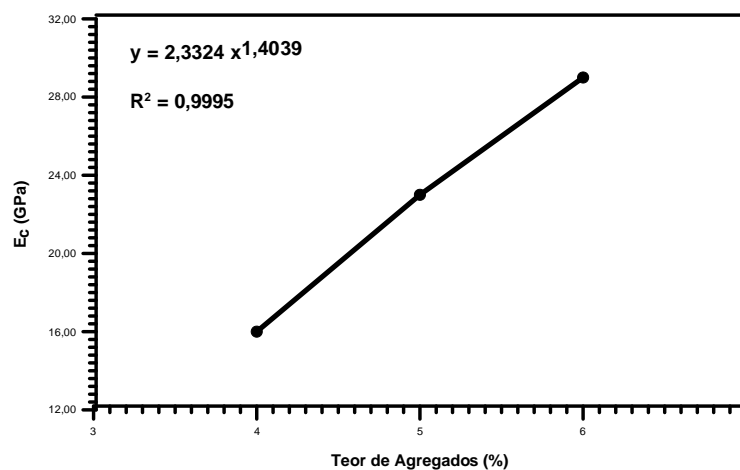


Figura 25 - Influência do módulo de elasticidade em função do teor de agregado na mistura  
Fonte: Melo Neto e Helene (2002)

Tabela 15 - Módulo de elasticidade para concretos produzidos com agregados de diferentes natureza.

NATUREZA DO AGREGADO	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)				
	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
Calcário	20,2	28,4	32,5	32,7	34,4
Gnaisse	17,5	28,7	32,1	33,6	35,5
Dolomita	26,3	35	38,6	39,5	39,9
Basalto	22,9	33,5	36,7	39,5	39,9

Fonte: Alhadadas (2008)

A dimensão máxima característica do agregado graúdo também pode influenciar no módulo de elasticidade do concreto, porém não há consenso na literatura. Barbosa et. al. (1999) encontraram valores de módulo de elasticidade maiores para concretos produzidos com agregados graúdos de basalto com  $D_{máx} = 19,5$  mm do que os com  $D_{máx} = 9,5$  mm. No entanto, Rohden (2011) relata que a dimensão máxima característica do agregado graúdo não

influenciou significativamente no módulo de elasticidade de um mesmo concreto dosado com diferentes tamanhos de agregados (Figura 26).

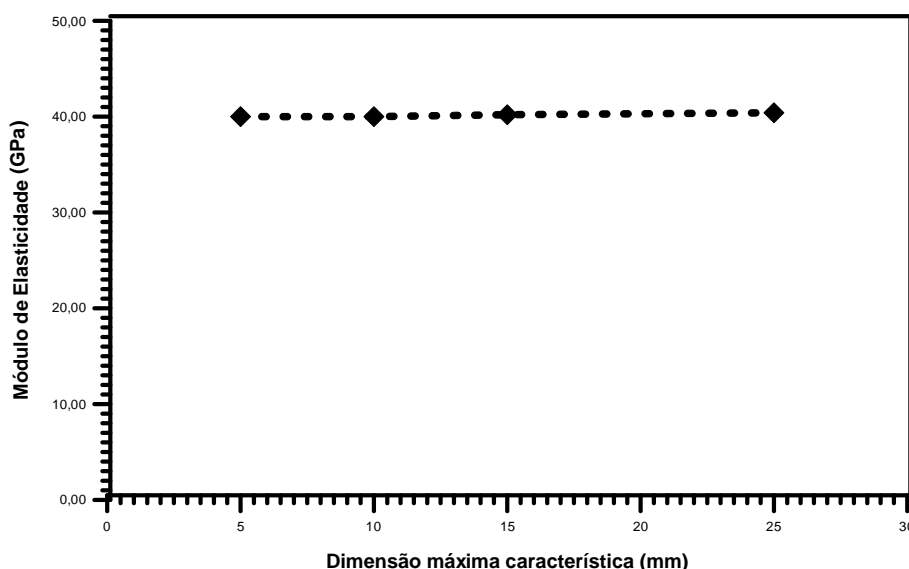


Figura 26 - Efeito da dimensão máxima característica do agregado graúdo no módulo de elasticidade médio do concreto  
Fonte: Rohden (2011)

Rohden (2011) explica que esses resultados opostos no módulo de elasticidade podem estar ligados à sobreposição de dois efeitos. Para concretos produzidos com baixos consumos de água, a diminuição de  $D_{máx}$  causa um aumento da resistência à compressão e, assim sendo, do módulo de elasticidade. Entretanto, o empacotamento granular melhora com o aumento de  $D_{máx}$  possibilitando dosagens de concretos com teores mais elevados de agregados graúdos, e assim, aumentando o módulo de elasticidade.

Mehta e Monteiro, 2014, estudaram a porosidade da matriz da pasta de cimento que influencia no módulo de elasticidade para concreto convencionais, e a porosidade da pasta de cimento é controlada pela relação água/cimento ( $a/c$ ) e grau de hidratação. Melo Neto e Helene (2002) relatam que uma diminuição  $a/c$  causa um aumento do módulo de elasticidade

Como visto anteriormente, a cura do concreto é responsável por promover a hidratação do cimento e, além de aumentar a resistência a compressão, aumenta também o módulo de elasticidade, porém, segundo Neville (2013) e Mehta e Monteiro (2014), o valor do módulo cresce mais rápido que o valor da resistência à compressão.

O concreto é um material complexo, e apesar de os agregados graúdos e da pasta de cimento apresentarem-se lineares no gráfico tensão x deformação, o concreto quando submetido à compressão observa-se a não linearidade da curva. Alterações na microestrutura, como o aumento do volume de vazios ou da quantidade de microfissuras na zona de transição pode exercer grande influência nas suas propriedades principalmente de resistência e deformabilidade. A zona de transição é o elo entre a pasta e o agregado graúdo. A rigidez do concreto não reflete totalmente a rigidez de cada um dos seus componentes, tanto que a curva tensão-deformação do concreto fica entre os diagramas da pasta de cimento e do agregado, geralmente lineares (MEIRA, 2009).

A não-linearidade do diagrama do concreto é proveniente da existência da zona de transição e de suas microfissuras. De acordo com Mehta e Monteiro (1994):

“a quantidade de microfissuras depende de inúmeros parâmetros, incluindo a distribuição granulométrica e tamanho do agregado, teor de cimento, relação água/cimento, grau de adensamento do concreto fresco, condições de cura, umidade ambiente e história térmica do concreto”.

Os concretos com baixa resistência apresentam maior capacidade de acomodação plástica, rompendo com deformações maiores, enquanto concretos de resistências elevadas têm uma curva tensão x deformação com maior inclinação na origem sendo relativamente frágeis (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O comportamento do CCR em relação ao módulo de elasticidade é similar ao concreto convencional. Segundo Adriolo (1989), os principais fatores que afetam ao módulo de elasticidade do concreto são: tempo de cura, quantidade e tipo de agregado e qualidade da pasta.

No concreto utilizado para pavimentação, onde a resistência à compressão não é o parâmetro básico no dimensionamento do material, mas sim, a resistência à tração na flexão, pode-se realizar a análise do módulo de elasticidade (ou seja, relativo ao carregamento estático) através do módulo cordal, admitindo-se uma distribuição linear das tensões e deformações na amostra. Através do ensaio à flexão é possível verificar a deflexão vertical que ocorre no ponto central da amostra, ou seja, a flecha, que ocorre com a aplicação do carregamento e

pode ser medida com auxílio de um transdutor elétrico de deslocamento acoplado a um dispositivo Yoke, posicionado na altura média da amostra prismática (MARANGON, 2011).

Ao se realizar o ensaio de tração na flexão a máquina confere duas cargas concentradas, cada uma delas à distância de  $L/3$  (um terço do vão livre) até o apoio mais próximo. A deflexão vertical do ponto central da amostra, ou seja, a flecha será medida por meio de um transdutor elétrico de deslocamento acoplado a um dispositivo tipo “Yoke” (JSCE-SF4, 1984) (Figura 27), posicionado à altura média da amostra prismática.

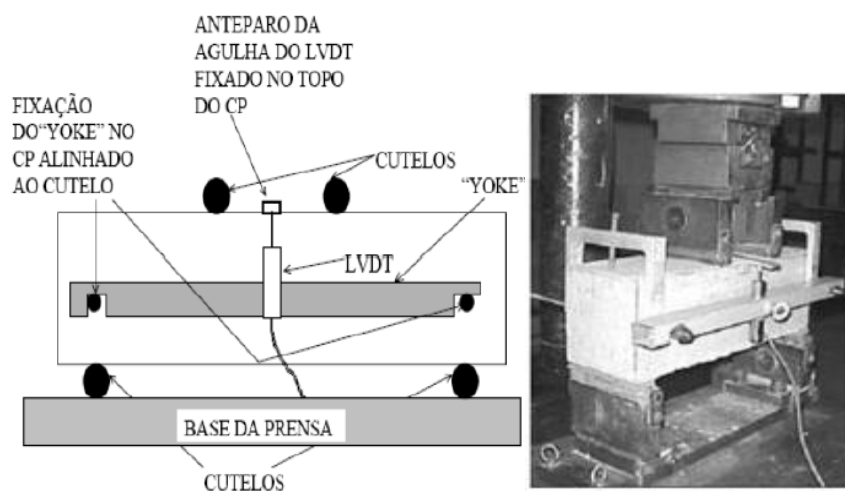


Figura 27 - Desenho esquemático do ensaio de tração na flexão com suporte “yoke” e LVDT para medida da deformação.

Fonte: JSCE-SF4 (1984)

O módulo de elasticidade à tração na flexão do material pode ser obtido de duas maneiras:

- a) pela deformação medida no centro da superfície inferior da vigota por meio de strain gage de contato e;
- b) por analogia de Mohr, onde é conhecido a força aplicada e o deslocamento (flecha) sofrido no centro do vão da vigota, sendo a aquisição da magnitude da flecha obtida pela instrumentação por LVDT-linear variable differential transformer ( $10^{-6}$ mm), Figura 28.





Fonte : Dissertação de mestrado Paulo Cesar Pinto – 2010

Figura 28 - Corpos de prova prismático com medições por LVDT no centro do vão da vigota (Fig-28A) e com strain gage fixado na face inferior (Figura 28B).

Fonte: Pinto (2010)

Utilizando-se a medida de flecha no centro da viga, com uso de LVDT (Linear Variable Differential Transformer), através do dispositivo “Yoke”, também é possível determinar o módulo de elasticidade, a partir do ensaio de tração na flexão por meio da analogia de Mohr.

A partir do valor da flecha obtido pelo LVDT se obtém o módulo de elasticidade estático de uma respectiva amostra, sendo necessário adotar um carregamento e deslocamento máximo, podendo variar entre 60 a 80% da carga de ruptura (ZANELLA, 2014).

O cálculo do módulo de elasticidade que se apresenta pela analogia de Mohr, que se apresenta na Equação 6, para o caso de um corpo de prova prismático em ensaio de tração na flexão com dois cutelos:

$$E = \frac{23.P.l^3}{108.b.h^3.f} \quad (6)$$

onde:

E = Módulo de elasticidade do concreto no ensaio de tração na flexão (MPa);

P = Carga no valor de 60 a 80% da carga de ruptura (N);

L = Distância do vão entre os apoios (mm);

b = Largura do corpo de prova (mm);

h = Altura do corpo de prova (mm);

f = Deslocamento no meio do vão (flecha) em relação a carga P (mm).

Na tese de doutorado de Taissachet (2012) e a dissertação de mestrado Pinto (2010), realizaram seus ensaios de resistência à tração na flexão com aplicação de carga em apenas um cutelo superior, disposto no meio do vão do corpo de prova prismático do CCR, e apoiados a dois cutelos inferiores, dispostos a cada 20mm da borda vertical do corpo de prova. Na qual a medida do módulo de elasticidade, através da flecha no centro do vão, por meio da analogia de Mohr, para um cutelo, foi obtida através da Equação 7:

$$E = \frac{P.l^3}{4.b.h^3.f} \quad (7)$$

Pinto (2010) usou escória granulada de alto forno no CCR, em substituição a areia, variando este percentual deste resíduo entre 50 a 100%. No seu trabalho determinou os módulo de elasticidade pela analogia de Mohr (LVTD) e pela curva tensão x deformação (strain gage) e verificou que os valores do módulo de elasticidade foram maiores na faixa de 18% a 36% para as medição realizadas por strain gage, Figura 29.

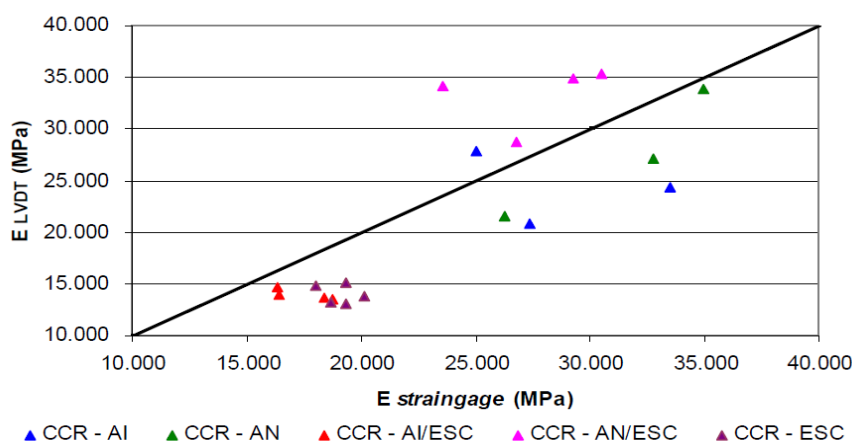


Figura 29 - Relação entre módulos de elasticidade estático medidos em corpo de provas estáticos.

Fonte: Pinto (2010)

Taissachet (2012) usou no seu CCR, o fresado asfáltico ou Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), material proveniente da fresagem de revestimento asfáltico, quando da restauração de pavimentos flexíveis. Foi utilizado no CCR 100% de fresado em substituição a areia, pedrisco e brita 1 e 50% em substituição ao agregado natural. Comparando os resultados dos módulos de elasticidade nos corpo de prova prismáticos, indicaram valores maiores no ensaio medido por (strain gage-SG), Figura 30.

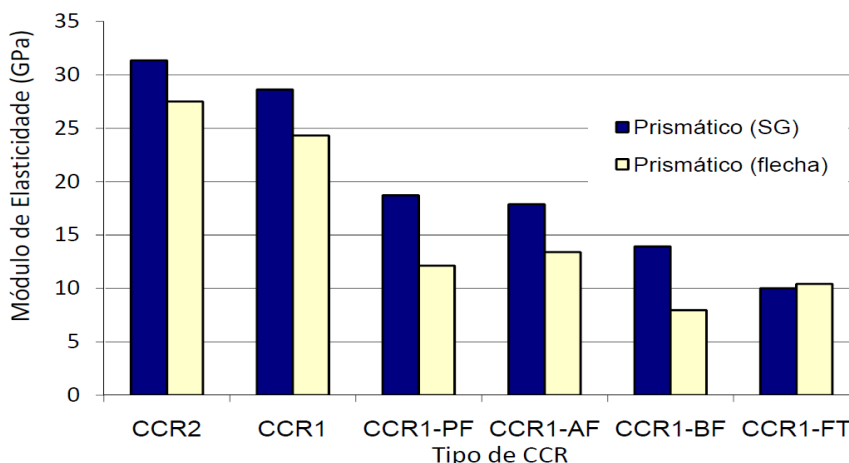


Figura 30 - Resultados dos Módulos de elasticidade pela curva tensão x deformação (SG) e por analogia de Mohr (LVDT).

Fonte: Taichet (2012)

Tseng (2010) usou para pavimentos de concreto, agregados provenientes da britagem de antigas placas de concreto. O trabalho apresenta resultados de módulo de elasticidade dos agregados produzidos através da britagem de antigas placas de concreto em britadores de mandíbula e de impacto, bem como a influência do uso de agregados reciclados nas propriedades mecânicas do concreto. O valor de módulo de elasticidade obtido através da curva tensão x deformação (strain gage-SG) no ensaio de tração na flexão e aquele obtido através da analogia de Mohr (LVDT), no mesmo ensaio são razoavelmente próximos, Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados obtidos no ensaio de tração na flexão aos 28 dias.

Tensão de Tração na flexão Média (MPa)	Módulo de Elasticidade Médio (LVDT) (GPa)	Módulo de Elasticidade Médio (SG) (GPa)
5,5	26	29
5,3	23	27
4,8	23	22
4,6	23	22
5,0	22	19
4,4	22	20
4,5	23	28

Fonte: Tseng (2010)

#### 2.7.5.4 Módulo de elasticidade dinâmico

##### 2.7.5.4.1 Módulo de elasticidade dinâmico a partir do ensaio estimulado por impulso

O método de estímulo por impulso consiste em obter as frequências naturais de vibração do concreto a partir da resposta acústica provocada pelo impacto de um pulsador no corpo de prova e, com base na sua massa e dimensões, é calculado o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Nota-se que não existe uma normalização nacional sobre este ensaio, sendo a ASTM E 1876-09 a norma de referência para a sua realização. Esta norma prescreve que os corpos de prova a serem ensaiados devem possuir geometrias regulares, ou seja, devem ser paralelepípedos retangulares, cilíndricos ou discos.

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido tanto pelas frequências flexionais (no qual o impulso e a captação ocorrem no centro do corpo de prova) quanto longitudinais (no qual o impulso é aplicado em uma extremidade e captado no lado oposto do corpo de prova), sendo que o valor do módulo obtido no modo flexional é superior ao obtido no modo longitudinal (PACHECO, 2014).

Assim, o módulo de elasticidade, a partir da frequência flexional, pode ser calculado por, equação 8, 9, 10 e 11:

$$E = 1,6067 \cdot \left( \frac{L^3}{D^4} \right) \cdot (m \cdot f_f^2) \cdot T_i' \quad (8)$$

$$T_i' = 1 + 4,939(1 + 0,0752 \cdot \mu + 0,8109 \cdot \mu^2) \cdot \left( \frac{D}{L} \right)^2 - 0,4883 \cdot \left( \frac{D}{L} \right)^4 \quad (9)$$

$$- \left[ \frac{4,691 \cdot (1 + 0,2023 \cdot \mu + 2,173 \cdot \mu^2) \cdot \left( \frac{D}{L} \right)^4}{1 + 4,754 \cdot (1 + 0,1408 \cdot \mu + 1,536 \cdot \mu^2) \cdot \left( \frac{D}{L} \right)^2} \right]$$

No caso da frequência longitudinal, o módulo de elasticidade pode ser calculado por:

$$E = 16 \cdot m \cdot f_l^2 \cdot \left( \frac{L}{\pi \cdot D^2 \cdot k} \right) \quad (10)$$

$$K = 1 - \left( \frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot D^2}{8 \cdot L^2} \right) \quad (11)$$

onde:

$D$  = Diâmetro do corpo de prova (mm);

$L$  = Comprimento do corpo de prova (mm);

$m$  = Massa do corpo de prova (g);

$f_f$  = frequência de ressonância fundamental flexional (Hz);

$f_l$  = frequência de ressonância fundamental longitudinal (Hz);

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

No método de estímulo por impulso são aplicadas tensões muito baixas, Neville (1982), o que consequentemente resulta em deformações instantâneas também muito baixas. Sendo assim, o módulo de elasticidade dinâmico obtido por esse ensaio representa o comportamento elástico do concreto e seu valor se aproxima do módulo tangente inicial estático (sendo consequentemente superior ao módulo secante estático). Segundo Mehta & Monteiro (1994), o módulo de elasticidade dinâmico é geralmente 20%, 30% e 40% superior ao módulo de elasticidade estático para concretos de alta resistência ( $f_{ck} \geq 40\text{MPa}$ ), média resistência ( $20 < f_{ck} < 40\text{MPa}$ ) e baixa resistência ( $f_{ck} \leq 20\text{MPa}$ ), respectivamente.

#### 2.7.5.4.2 Módulo de elasticidade a partir do ensaio de determinação da velocidade de onda ultrassônica

De acordo com o ASTM C597-16 o método de ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica em corpos de prova de concreto é aplicável para avaliar a uniformidade e a qualidade relativa do concreto e indicar a presença de vazios. As ondas longitudinais com frequências que variam de 20kHz a 150kHz são as normalmente usadas, já os tempos de percurso entre a partida inicial e recepção do pulso são medidas eletronicamente.

O método de velocidade de pulso ultra-sônico consiste em medir o tempo de viagem de um pulso ultra-sônico, passando pelo concreto a ser testado. O circuito do gerador de impulsos consiste em circuito eletrônico para gerar pulsos e um transdutor para transformar esse pulso eletrônico em energia mecânica tendo frequências de vibração na faixa de 15 a 50 kHz. O tempo de viagem entre o início inicial e a recepção do pulso é medido eletronicamente. A trajetória do comprimento entre transdutor dividido pelo tempo de viagem dá a média da velocidade de propagação das ondas (CHAVHAN, 2015) (Equação 12):

$$E = \rho V^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (12)$$

onde:

E = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

$\rho$  = massa específica (kg/m<sup>3</sup>);

V = velocidade (km/s);

$\mu$  = Poisson's ratio ( para alta resistência do concreto,  $\mu = 0.15$  , para baixa resistência do concreto,  $\mu = 0.30$  ).

Há três métodos de propagação e recebimento do pulso ultrassônico (CHAVHAN, 2015):

- a) face oposta (transmissão direta-longitudinal), Figura 31;
- b) face adjacente (transmissão semi-direta), Figura 32; ou
- c) a mesma face (transmissão indireta), Figura 33.

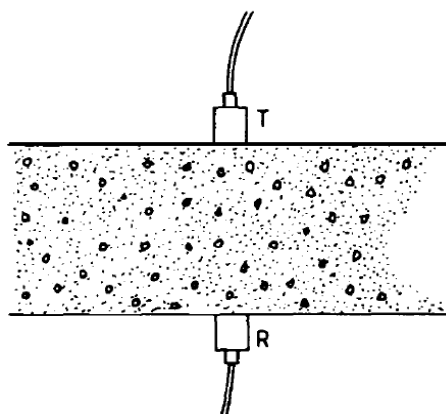


Figura 31 - Transmissão direta  
Fonte: Chavhan (2015)

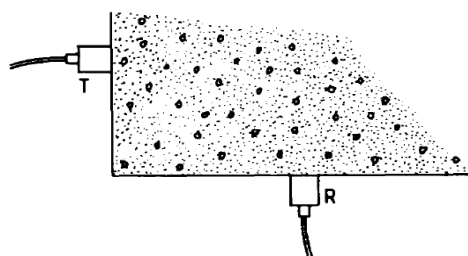


Figura 32 - Transmissão semi-direta  
Fonte: Chavhan (2015)

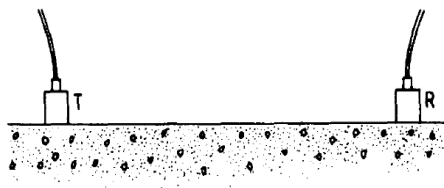


Figura 33 - Transmissão indireta  
Fonte: Chavhan (2015)

Segundo a ABNT NBR 8802:2013 o arranjo de transmissão direta (longitudinal) é mais recomendado na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas através do material, pois desta forma as ondas são recebidas com maior intensidade.

Wolle, Costa e Bauer (1973) citam que vários fatores influenciam na velocidade de propagação do som em concreto, dentre eles: idade do concreto, características elasto-mecânicas, massa específica, tipo de cimento utilizado, fator água/cimento, umidade da peça ensaiada, possível existência de aço (concreto armado), direção do ensaio na peça e tipo de adensamento do concreto

No caso de testes realizados no concreto muito deteriorado, a variação dos resultados é substancialmente aumentada. A atenuação é afetada pela natureza da deterioração e a frequência de ressonância do transdutor. As diferenças entre operadores ou instrumentos podem interferir nos resultados dos testes, de modo considerável, chegando a 20%. Nesses casos, as velocidades calculadas serão suficientemente baixas para indicar claramente a presença de deficiências patológicas no concreto analisado, conforme especificado na ASTM C597-09 (PACHECO, 2014).

No entanto, devem-se levar em consideração os fatores que influenciam nos resultados, ressaltando desta forma a distância entre as superfícies de contato dos transdutores; a presença de armadura, principalmente no sentido de propagação da onda; massa específica do concreto, que depende do traço e das condições de concretagem; tipo, massa específica e outras características dos agregados; tipo de cimento e grau de hidratação; direção de ensaio da peça; tipo de adensamento e idade do concreto (PACHECO, 2014).

De acordo com Abo-Qudais (2005) o tamanho do agregado utilizado no concreto também se constitui em um fator determinante. Segundo o referido autor, quanto maior o tamanho do mesmo, maior a velocidade das ondas ultrassônicas, o que também é afirmado por Evangelista (2002), ao mostrar que concreto com agregados de massa específica maior ou com maiores

quantidades de agregado, apresentam maior velocidade. Popovics (2005), afirma que a velocidade de pulso verificada em concretos de mesmo traço e com mesmo nível de resistência, porém fabricados com diferentes tipos de agregados graúdos, podem ser diferentes. Já os concretos confeccionados com cascalho arredondado apresentam menor velocidade de pulso quando comparado com concreto confeccionado com pedra calcária ou com granito que, por sua vez, apresentaram valores maiores e intermediários, respectivamente.

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado através de métodos não destrutivos. Shehata (2005) destaca dois métodos: um que relaciona o módulo com a frequência natural de vibração (método do estímulo) e outro que relaciona o módulo com a velocidade de propagação de ondas de ultrassom no corpo de prova. De acordo com Pereira & Rodrigues (2010), as técnicas baseadas nas frequências naturais são mais utilizadas para a caracterização de materiais cerâmicos, frágeis e para caracterização em altas temperaturas, enquanto que a técnica de propagação de ondas ultrassônicas é mais utilizada para a caracterização de metais e de concretos na construção civil.

A Tabela 17 apresenta normas para ensaio de ultrassom e algumas diferenças entre seus procedimentos (EVANGELISTA, 2002).

Tabela 17 - Normas para ensaios de propagação de ondas ultrassônicas.

Parâmetro	NORMAS		
	ABNT NBR	BS 1881	ASTM
Frequência do Ultrassom	Acima de 20KHz	20 KHz a 150 KHz	20KHz a 100KHz
Superfície	Seca ao ar, limpa e plana	Seca ao ar, limpa e plana	Seca ao ar, limpa e plana
Área de ensaio para verificar	1m <sup>2</sup>	-	-
Distância entre transdutores	Precisão de ± 1%	Precisão de ± 1%	Precisão de ± 0,5%
Medições de velocidade	Precisão de ± 1%	Precisão de ± 0,5%	Precisão de ± 0,5%

Fonte: Evangelista (2002)

### 2.7.6 Influências na adição de materiais pozolânicos no Concreto Compactado com Rolo (CCR)

Del Carpio (2009) estudou a adição da cinza da casca do arroz no cimento Portland no CCR. O efeito químico das pozolanas está associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio – Ca(OH)<sub>2</sub> -formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar silicato de



cálcio hidratado adicional, que é o principal produto responsável pela resistência das pastas de cimento hidratados. A reação entre o hidróxido de cálcio e a sílica amorfa existente na pozolana, inicia-se predominantemente após os 28 dias de idade, o que explica o maior desenvolvimento de resistência a partir deste período.

A “reação pozolânica” não é limitada à interação cal-sílica, mas inclui todas as reações cimentícias no sistema  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ . A diferença em relação às reações cimentícias na hidratação do cimento Portland é principalmente devido às taxas de reação, e não no caráter dos produtos de hidratação. Entretanto, a reação pozolânica, como outras reações químicas, pode ser acelerada pela temperatura e por aceleradores químicos como álcalis e sulfatos (DAFICO, 2001).

Del Carpio (2009) apud Isaias (2005) comentaram que a adição de pozolana no cimento Portland, também poderá gerar efeitos físicos, que são os seguintes:

- a) **efeito microfiller:** aumento da massa específica da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento;
- b) **refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento:** causado pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação. Dessa forma, o crescimento dos cristais ocorrerá não somente a partir da superfície dos grãos de cimento, mas também nos poros ocupados pela adição e pela água (a adição restringe os espaços nos quais os produtos de hidratação podem crescer, gerando um grande número de pequenos cristais ao invés de poucos cristais de grande tamanho);
- c) **alteração da microestrutura da zona de transição:** a colocação de adições finamente divididas interfere na movimentação das partículas de água em relação aos sólidos da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que normalmente fica retida sobre os agregados. Além disso, elas diminuem a espessura da zona de transição pelo preenchimento dos vazios deixados pelas partículas de cimento próximas à superfície do

agregado (efeito microfiller), interferem no crescimento dos cristais, restringindo seus tamanhos e reduzindo o grau de orientação dos cristais de hidróxido de cálcio junto ao agregado (partículas de adição agindo como pontos de nucleação) e reduzem a concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Todos estes efeitos melhoram significativamente a zona de transição, refletindo num aumento de desempenho do concreto sob o ponto de vista mecânico e de durabilidade.

CAO et al. (2000) analisaram a resistência e o efeito da cinza volante no Concreto Compactado com Rolo com alto volume de cinza volante, adicionando este resíduo no cimento Portland.

Os principal efeito útil da adição da cinza volante no concreto, consiste de tres aspectos denominados: efeito morfológico, efeito pozolânico e efeito microagregação.

- a) **Efeito morfológico** : há muitas microesferas na cinza volante trabalhando como “bolas lubrificantes” quando incorporadas no concreto fresco beneficiam a consistência (trabalhabilidade);
- b) **Efeito microagregado** : as microesferas podem se dispersar no concreto e combinar firmemente com o gel gerado da hidratação do cimento e aumentar a densidade do concreto;
- c) **Efeito pozolânico** : é o principal efeito da cinza volante , que é a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) presente na estrutura amorfa reage químicamente com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) gerado da hidratação do cimento. O gel produzido desta reação pozolânica pode preencher os vazios capilares do concreto, e este efetivamente contribuirá com a resistência do concreto, especialmente em concretos com alto volume de cinza volante(frequentemente a geração da resistência a longo prazo é o principal efeito pozolânico).

A adição de cinza volante na mistura variou de 0% a 72%, em substituição a  $300\text{kg/m}^3$  de cimento, Tabela 18 (CAO et al., 2000).

Tabela 18 - Proporção da mistura do CCR com alto volume de cinza.

Tipo de Mistura	Cinza Volante (%), em massa	Cimento (%), em massa	Relação (a/c)
F0	0	100	0,35
F45	39	61	0,37
F55	46	54	0,39
F65	53	47	0,40
F75	60	40	0,42
F85	66	34	0,43
F95	72	28	0,44

Fonte: CAO et al. (2000)

Na Figura 34, estão plotados os resultados da resistência à tração com os tempos de cura (3, 7, 28 e 90 dias)

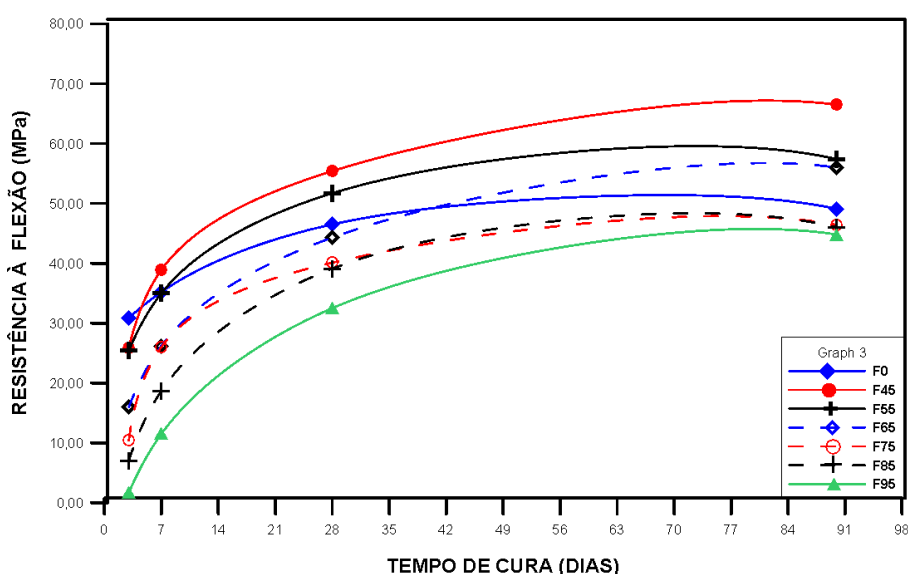


Figura 34 - Resultados de resistência á tração em função com o tempo de cura

Fonte: CAO et al. (2000).

A análise dos resultados da resistência à tração mostram (CAO et al., 2000):

- o efeito da cinza volante começa a partir dos sete dias de cura e desenvolve-se rapidamente. A contribuição da cinza volante aos 90 dias de cura, excede a resistência(sem cinza volante), ou aproxima-se a 50%, e notavelmente o ganho de resistência à tração é maior do que a resistência a compressão;
- a distribuição de poros com alto volume de cinza volante é benéfico, pois reduz o tamanho dos poros e o volume da porosidade total;

- c) e finalmente, pode-se concluir que, em primeiro lugar há um aumento do grau de hidratação do cimento devido a presença da cinza volante e em segundo lugar as reações pozolânicas que irão ocorrer ao longo do tempo excedendo a resistência em 50%.

Babu (2012) adicionou entre 50 a 85% de cinza volante no cimento Portland, Tabela 19.

Tabela 19 - Dosagem do CBR usando cinza volante.

Mistura	Cimento( C ) (kg/m <sup>3</sup> )	Cinza volante(f) (kg/m <sup>3</sup> )	$\frac{f^1}{(c + f)} \times 100$ (%)
CCR1	50	283	85
CCR2	90	270	75
CCR3	150	350	70
CCR4	190	285	60
CCR5	250	167	40
CCR6	260	260	50

Fonte: Babu (2012)

1= Percentual de cinza na adição com o cimento

Neste estudo da adição de cinza volante, Tabela 19, para verificar seu efeito, foram realizados ensaios de compressão simples, diametral, módulo de elasticidade estático e dinâmico, com tempos de cura de 7, 28 e 90 dias.

Os efeitos da cinza volante nos resultados das propriedades mecânicas do CCR, seguem abaixo (BABU, 2012).

#### a) Compressão simples

Na Figura 35, os resultados indicam que a resistência à compressão do CCR para as seis misturas alcançaram as seguintes faixas: 7 a 35MPa para 7 dias, 32 a 48MPa para 28 dias e 19 a 61 MPa para 90 dias. Onde 50% de cinza volante(CCR6) alcançou os maiores resultados e a inclusão de 85% (CCR1) os menores resultados.

Estes estudos de Babu (2012) estão de acordo com outros trabalhos que usaram no CCR alto teores de cinza volante, como podemos observar na Tabela 20, mostrando que o tempo de cura é significativo para o aumento da resistência à compressão.

Tabela 20 - Resultados de outros autores usando alto volume de cinza volante no CCR.

Autor	Cimento (c) (kg/m <sup>3</sup> )	C.V. (f) (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa)		
			7d	28d	90d
Tangtermsirikul, 2004	49	194	6,8	15,7	22,3
	258	65	43,6	52,0	64,4
	245	61	31,4	47,5	57,0
	53	51	2,1	4,0	7,0
	94	207	14,1	23,6	29,0
ACI, 1999	104	260	7,9	14,2	27,0
	47	19	4,1	8,1	11,9
	187	109	14,0	23,5	30,8

Fonte: Babu (2012)  
C.V. = Cinza Volante

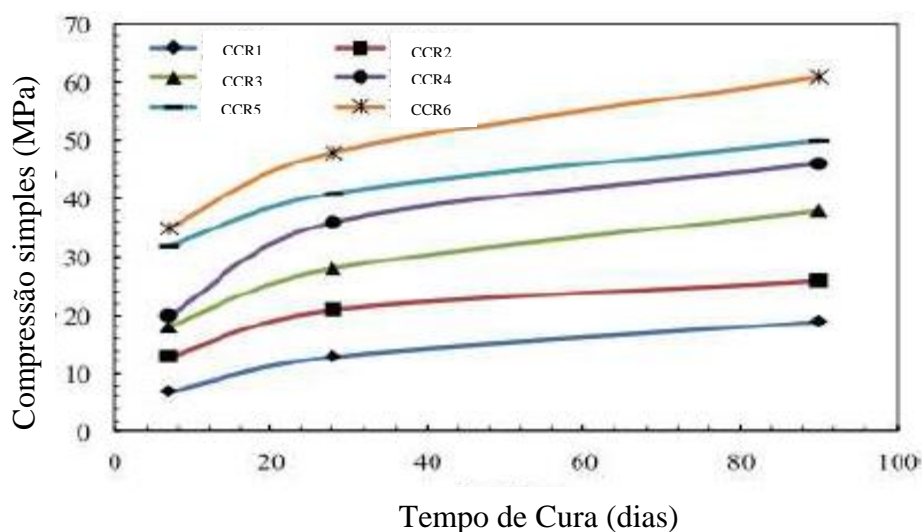


Figura 35 - Ganho de resistência à compressão em função do tempo de cura após a moldagem  
Fonte: Babu (2012)

Podemos observar, também, na Figura 35, a influência da variação do tempo de cura na resistência à compressão com o uso de cinza volante. As resistências aumentam nos primeiros setes dias até 28 dias de cura, em média, de 74%, 68% e 33% para cinzas de volume muito

alto de cinza volante (RCC1 e RCC2), volume alto de cinza volante (RCC3 e RCC4) e volume moderado de cinza volante, respectivamente.

Nos 28 dias até 90 dias de cura a resistência à compressão aumentou, em média, 35%, 32% e 25% para (RCC1 e RCC2), (RCC3 e RCC4) e (RCC3 e RCC4), respectivamente. Estas observações sugerem que embora a resistência foi inferior para muito alto e moderado de volume de cinza volante devido ao baixo teor de cimento, a taxa de resistência para este dois volumes foram maiores nos período de cura.

Babu (2012) mostra na Figura 36, a relação entre os resultados de resistência a compressão (Mpa) e os teores de cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e em função do tempo de cura, para os seis tipos de misturas do CCR.

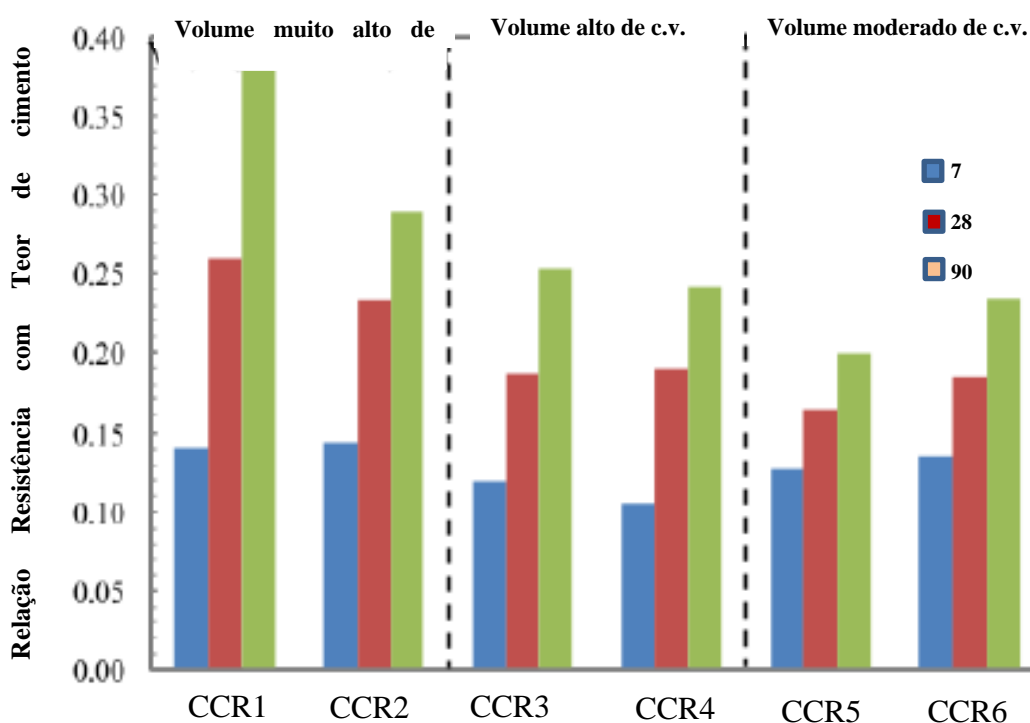


Figura 36 - Relação entre resistência à compressão e o teor de cimento nas seis misturas do CCR.

Fonte: Babu (2012)

A Figura 36 mostra que as misturas de volume muito alto de cinza volante (CCR1 e CCR2), foram as que apresentaram as mais altas relações, para todos os tempos de cura.

Esta observação sugere que é possível obter o máximo benefício com o cimento com conteúdo de cinzas volantes de muito alto volume, possivelmente as partículas de cinza volante servem como nucleação da hidratação das partículas de cimento, isso é, há um aumento do grau de hidratação, devido a presença das partículas de cinza volante. Portanto, de acordo com o tipo de projeto e o requisito de resistência à compressão, pode ser vantajoso escolher a quantidade apropriada de cimento e a quantidade máxima possível de cinzas volantes em CCR para concreto comercial e econômico.

### b) Compressão diametral

A resistência à tração no concreto é de interesse principalmente para pavimento. Portanto o entendimento do comportamento da tensão de tração e sua relação com a resistência à compressão com diferentes percentuais de cinza volante é usual na aplicação no Concreto Compactado com Rolo-CCR. Na Tabela 21, são mostrados os resultados da compressão diametral de corpos cilíndrico curados a 90 dias e resistência à compressão simples (BABU, 2012).

Tabela 21 - Resultados de resistência à compressão simples e diametral.

Mistura	Peso Específico Aparente Seco (kN/m <sup>3</sup> )	Resistência à Compressão (MPa)			Compressão Diametral (f <sub>t</sub> ) (MPa)(90d)
		7d	28d	90d	
CCR1	22,75	7	13	19	1,85
CCR2	23,02	13	21	26	3,18
CCR3	24,03	18	28	38	3,50
CCR4	25,62	20	36	46	3,95
CCR5	24,98	32	41	50	4,14
CCR6	24,41	35	48	61	4,46

Fonte: Babu (2012).

Os resultados da Tabela 21, a compressão diametral variam entre 1,8 a 4,5MPa para 90 dias de cura. A influência do teor de cimento na compressão diametral está indicado na Figura 37. Podemos observar que similarmente a resistência à compressão simples a compressão diametral melhora com o aumento do teor de cimento.

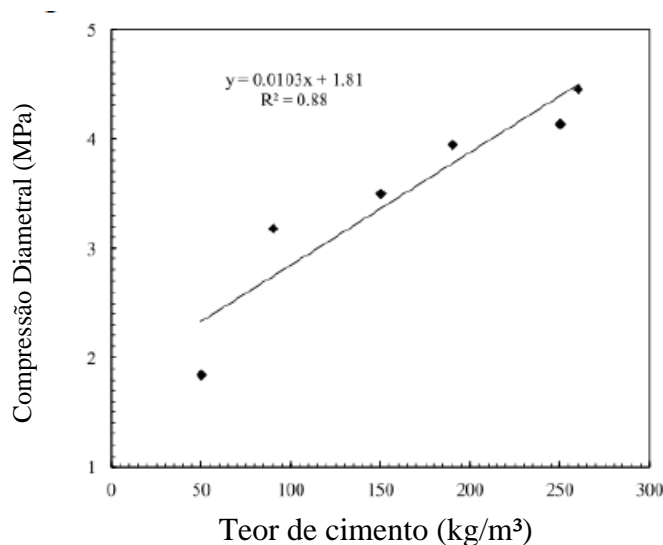


Figura 37 - Influência do teor de cimento na compressão diametral do CCR.

Fonte: Babu (2012).

Na Figura 38 são mostrados resultados da relação entre a resistências à compressão simples (RCS) e a compressão diametral (RCD) e estes valores variam entre 8,2% a 13,7%, para todas as misturas do concreto compactado com rolo. Os resultados indicam aos 90 dias de cura, que entre 50% (CCR6) a 85% (CCR1) a quantidade de cinza volante (cv) influência na resistência à compressão simples numa relação inversamente proporcional.

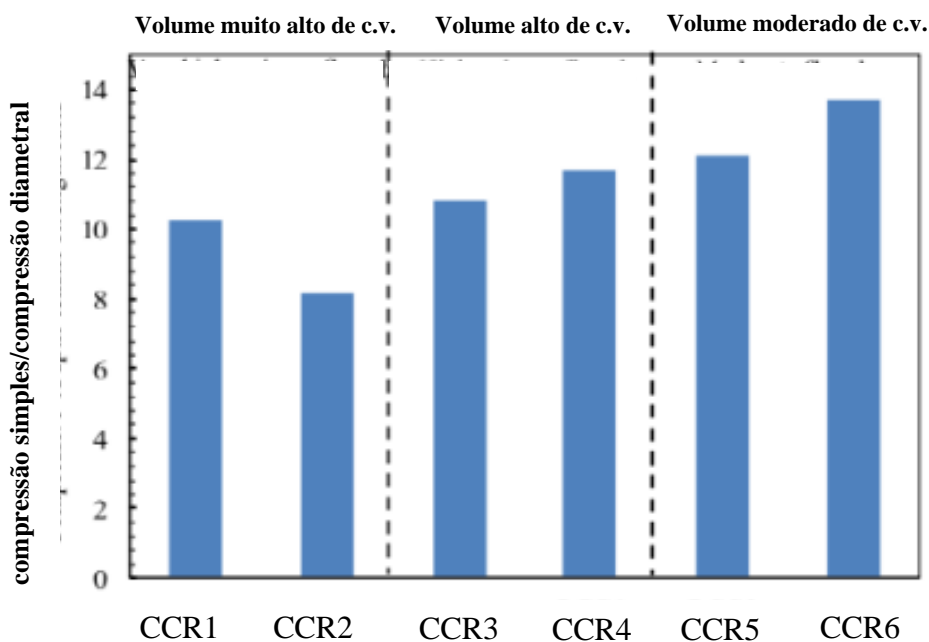


Figura 38 - Relação da resistência á compressão e compressão diametral das misturas para tempo de cura de 90 dias.

Fonte: Babu (2012).



Existem várias relações empíricas para relacionar a resistência à compressão do concreto com sua resistência à tração. Alguns das relações publicados são mostrados, na Figura 39. A Equação (13) foi sugerida por Raphael, 1984 , para concreto normal. A Equação (14) foi sugerida pela FIP, 1991 ,para concreto agregado leve. A Equação (15) foi utilizada no Código de Prática Britânico BS 8007 (1987) .

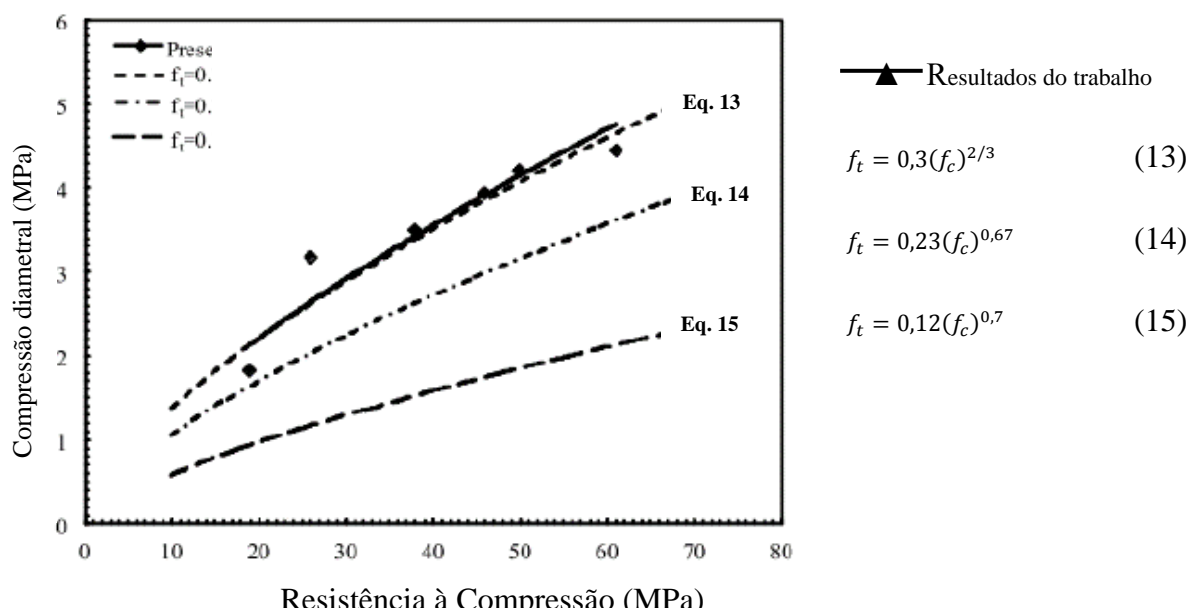


Figura 39 - Relação entre resistências à compressão simples e diametral.

Fonte: Babu (2012).

### c) Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade avaliado no concreto é mostrado na Tabela 22, os resultados indicam uma variação de 17 a 46 GPa para corpos de provas curados a 90 dias. Podemos observar, também, que o comportamento do módulo de elasticidade é similar as resistências à compressão e diametral, isso é, o aumento da cinza volante faz diminuir o módulo de elasticidade do concreto (BABU, 2012).

Tabela 22 - Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Mistura	Massa Específica Aparente Seca (kN/m <sup>3</sup> )	Resistência à Compressão ((MPa)	Módulo de Elasticidade (E) (GPa)
		90d	90d
CCR1	22,75	19	17
CCR2	23,02	26	28
CCR3	24,03	38	34
CCR4	25,62	46	33
CCR5	24,98	50	41
CCR6	24,41	61	42

Fonte: Babu (2012)

Várias relações existem entre a resistência à compressão simples e o módulo de elasticidade. Duas equações muito difundidas para o concreto são: a Equação 16 que é usada na relação com a resistência normal sugerida pela ACI Committe 318 (2005) e a Equação 17 que foi sugerida pela ACI363R para concretos de alta resistência até 83MPa. Na Figura 40 são mostrados os resultados da Tabela 21 de módulo de elasticidade em comparação com as Equações 16 e 17.

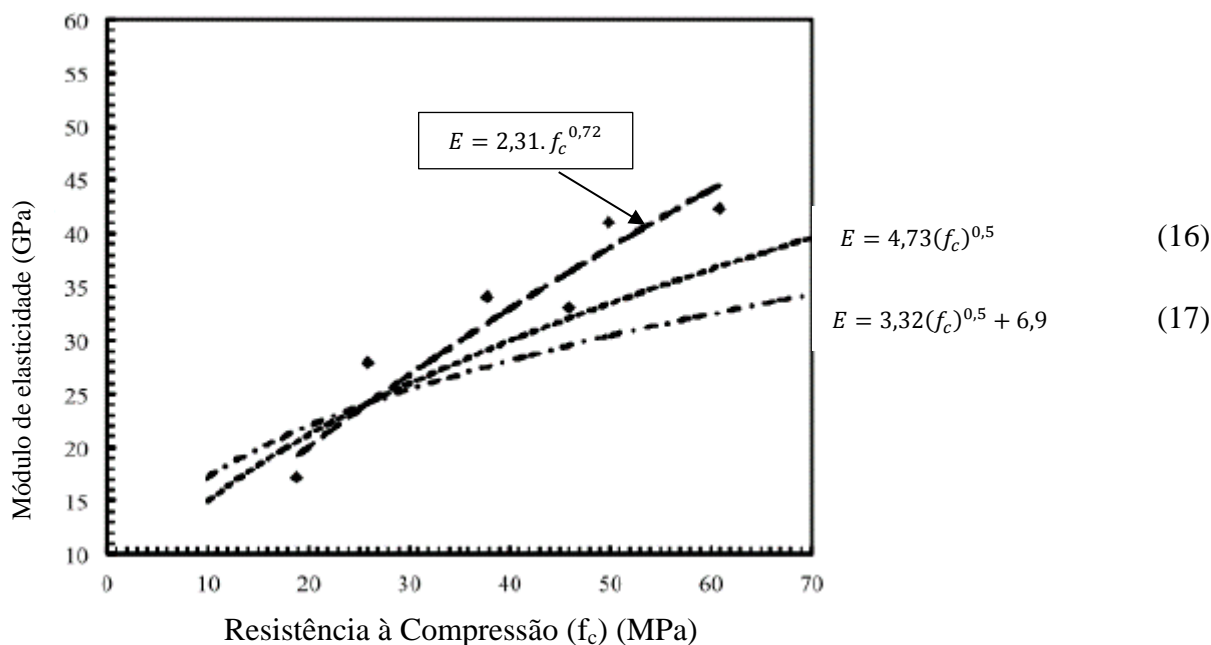


Figura 40 - Comportamento do módulo de elasticidade

Fonte: Babu (2012).

**d) Módulo de elasticidade dinâmico**

A velocidade do pulso ultra-sônico avaliada para os concretos são mostrados na Tabela 23. Os resultados indicaram que a velocidade do pulso ultra-sônico dos concretos variaram entre 3,57 a 4,55 km/s, para o tempo de cura de 90 dias dos corpos de provas exceto para a mistura CCR1.

Tabela 23 - Resultados de velocidade ultrasonica.

Mistura	Massa Específica Aparente Seca (kN/m <sup>3</sup> )	UPV (km/s)	Módulo de Elasticidade (E50) (GPa)
		90d	90d
CCR1	22,75	3,57	17
CCR2	23,02	4,55	28
CCR3	24,03	4,35	34
CCR4	25,62	4,55	33
CCR5	24,98	4,35	41
CCR6	24,41	4,35	42

Fonte: Babu (2012).

UPV = ultrasonic pulse velocity

A partir da Figura 41 pode-se observar que, de acordo com os critérios de avaliação ASTM C597 [26], todos os concretos cai em classe de boa qualidade exceto RCC1. Portanto, esta observação sugere que é possível produzir CCR de muito boa qualidade mesmo com consumo de cimento baixo 90kg/m<sup>3</sup> e volume de cinzas volantes muito altas 85% (BABU, 2012).

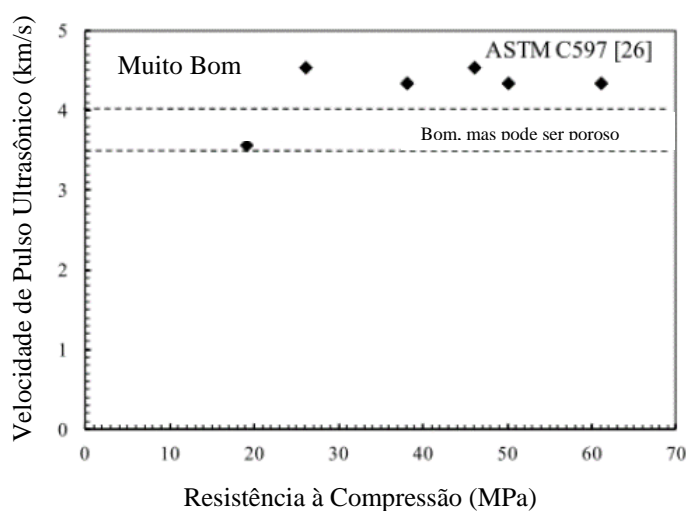


Figura 41 - Resultados da velocidade de pulso em função da resistência à compressão.

Fonte: Babu (2012).

No Brasil, ainda não existe norma para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Porém, a ABNT NBR 8802:2013 estabelece o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto, e tem como principais aplicações verificação da homogeneidade do concreto, detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições, monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico) principalmente pela ação de sulfatos.

Babu (2012) chegou as seguintes conclusões para os resultados das propriedades mecânicas do CCR adicionando cinza volante parcialmente em substituição ao cimento Portland:

- a) a resistência à compressão de todas as misturas (CCR1 a CCR6) aumentaram com o tempo de cura. Entre os tempos de cura 28 a 90 dias a taxa das resistências à compressão, em média, foram de 35%, 32% e 25% , para misturas com volumes muito altos, alto e moderados de cinzas volantes;
- b) a resistência à compressão no CCR com alto volume de cinza volante é predominantemente influenciada pelo teor de cimento do que o material cimentício total (cimento + cinza volante). O aumento do teor de cimento melhora ambas resistências à compressão e compressão diametral, contudo, a melhoria da compressão diametral é maior no CCR com volume muito alto de cinza volante (CCR5 e CCR6) do que volume alto e moderado;
- c) os valores do módulo de elasticidade estão intimamente ligados com a resistência à compressão, isso é, o módulo de elasticidade é diretamente proporcional a resistência à compressão. A relação empírica entre o módulo estático e a resistência à compressão é moderadamente ajustado com a equação sugerida pelo ACI 318 e ACI 363R até 35MPa da resistência à compressão. No entanto, a relação mostra valores de módulo de elasticidade mais elevados em resistências de compressão superiores a 35MPa.

### 2.7.7 Método racional no uso de cimento e cal hidratada para materiais compactados estabilitizados quimicamente.

As pesquisas na área de Geotecnia, principalmente para aplicação em fundações superficiais, taludes, pavimentos, etc., tem utilizado como recursos, principalmente no aspecto econômico, o uso de cimento ou cal hidratada para melhoria do solo local, onde se fará a obra de engenharia civil, isto é, busca-se a melhoria das propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas destes solos.

Quando utilizamos concreto em obras de engenharia, existem critérios racionais para que se possa prever a resistência à compressão do concreto, onde sabe-se que esta é intimamente ligada a relação água/cimento. O grupo de pesquisa do Professor Nilo Cesar Consoli, da Universidade Federal do Rio Grande do sul, tem desenvolvido nos últimos anos um método racional para uso destes aglomerantes (cimento Portland e cal hidratada) com materiais argilosos e arenosos compactados e ultimamente, por questões ambientais e também econômicas, tem pesquisado a substituição de solo por resíduos industriais, como por exemplo, cinzas volante e de fundo geradas a partir da queima de carvão mineral em termelétricas, principalmente no estado do Rio Grande do Sul. Também, tem substituído a cal hidratada por outro rejeito gerado da produção do gás de acetileno, produzido pela White Martins, que é o cal de carbureto.

Um dos primeiros trabalhos foi a dissertação de Foppa (2005), onde se pesquisou uma metodologia racional para solo de origem arenítica com cimento Portland. Por se tratar de compósito (solo-cimento) compactado, este trabalho teve como finalidade principal verificar as influências da variação do teor de cimento, porosidade e teor de umidade do material compactado e posteriormente, como se faz na relação água/cimento, se verificou a influência da relação porosidade/cimento sobre as propriedades mecânicas (e.g., compressão simples e triaxial).

No final, Foppa (2005), apresenta a influência dos resultados da compressão simples e tensão desviatória do ensaio triaxial em função da relação da porosidade e o teor volumétrico do cimento, Figura 42, bem como, as equações de previsão destes resultados.

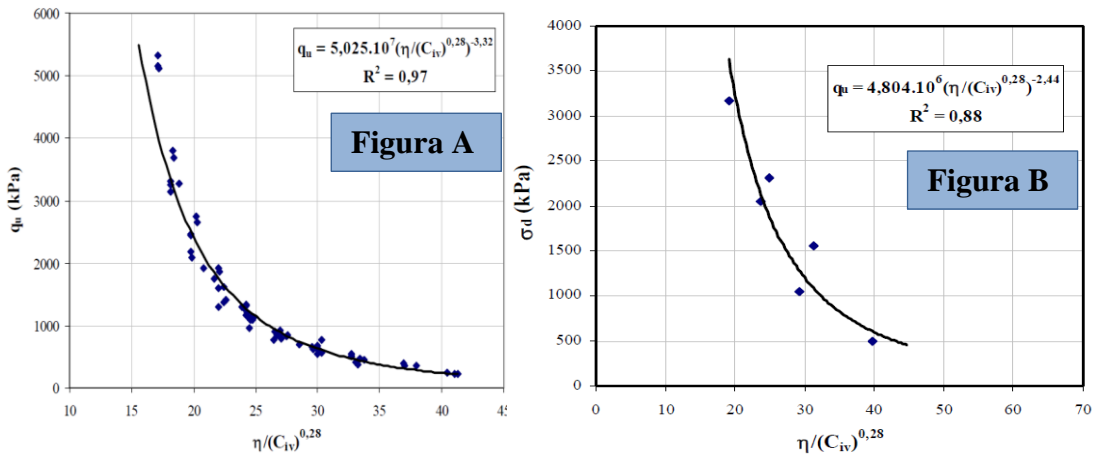


Figura 42 – Resultados da compressão simples(figura A) e tensão desviatória(figura B) em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal.

Fonte: Foppa (2005)

$$q_u = \frac{\eta}{(C_{iv})^{0,28}} \quad \sigma_d = \frac{\eta}{(C_{iv})^{0,28}} \quad (18)$$

onde:

$q_u$  = resistência à compressão (kPa) ;

$\sigma_d$  = tensão desviatória (kPa);

$\eta$  = porosidade (%);

$C_{iv}$  = teor volumétrico do cimento (%)

$$C_{iv} = \left( \frac{V_{ci}}{V_T} \right) \cdot 100$$

$V_{ci}$  = volume do cimento (m<sup>3</sup>);

$V_T$  = volume total da amostra (m<sup>3</sup>)

$$q_u = 5,025 \cdot 10^7 \cdot \left( \frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right)^{-3,32} \quad (19)$$

$$\sigma_d = 4,804 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{\eta}{C_{iv}^{0,28}} \right)^{-2,44} \quad (20)$$

As equações 19 e 20 indicaram um bom ajuste para os resultados de compressão simples e tensão desviatória com expoente interno de 0,28, enquanto que para os expoentes externos foram distintos -3,32 e -2,44 . Tudo indica que o expoente interno depende do tipo de mistura, neste caso, para ambos ensaios foi solo-cimento, enquanto que os expoentes externos e escalares das equações 19 e 10, são influenciados pelo tipo de ensaio.

Consoli et al. (2011) apresentam resultados de um solo arenoso tratado com cinza volante da queima do carvão mineral, gerada de termelétrica e cal hidratada, desenvolvendo um método de dosagem baseado num método racional. Neste trabalho foi avaliado a previsão de resistência à compressão em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal. Os parâmetros estudados para verificação dos resultados de ensaio foram: a quantidades de cinza volante e cal hidratada, porosidade e a relação vazios (porosidade) e cal hidratada (teor de cal).

Na Figura 43 são apresentados três gráficos (figuras 43A, 43B e 43C) mostrando a influência da relação porosidade e teor volumétrico da cal sobre os resultados da resistência à compressão, para os seguintes percentuais de cinza volante: 0%, 12,5% e 25%. Para todas as misturas foram usados os teores de cal hidratada de 3%, 5%, 7% e 9%.

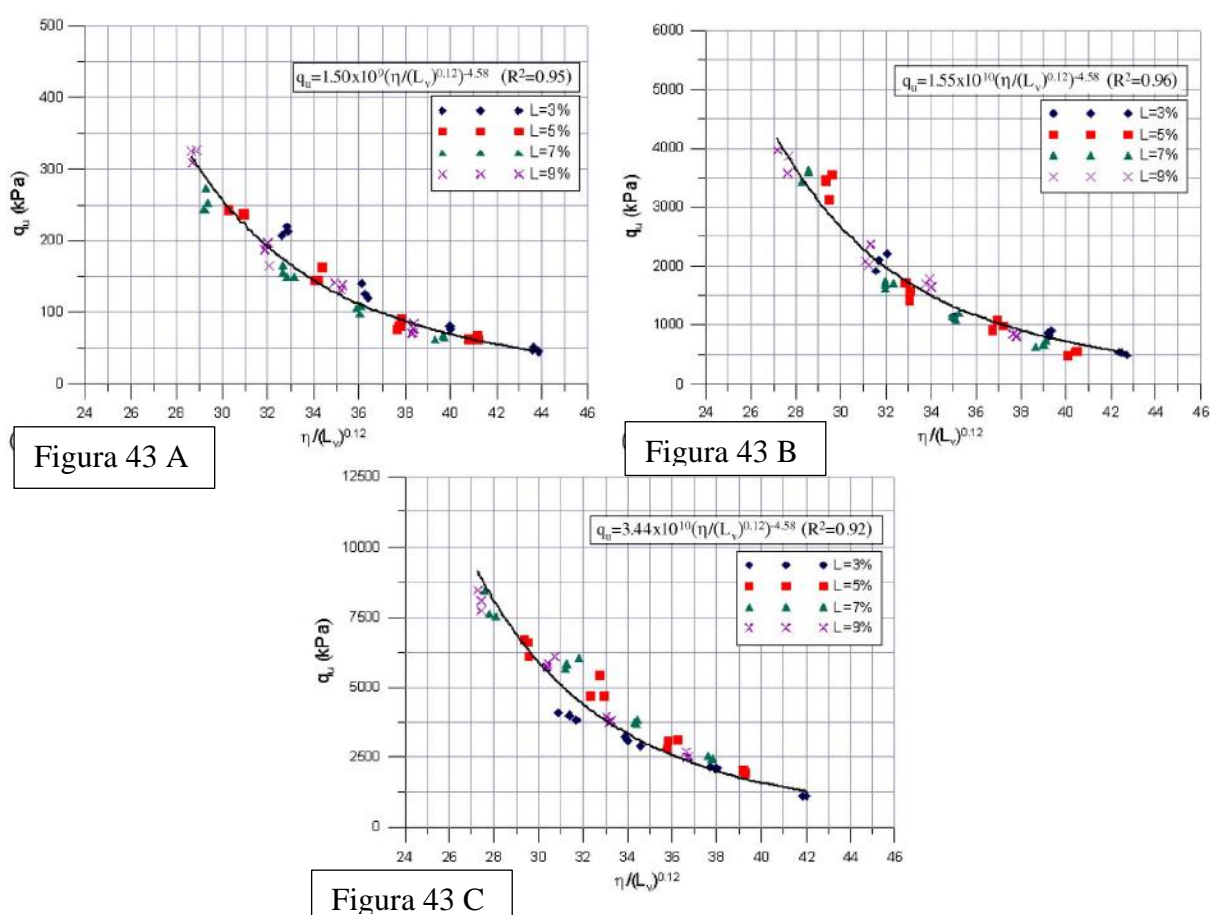


Figura 43 – Resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e teor volumétrico da cal para 0% (Figura 43A), 12,5% (Figura 43B) e 25% (Figura 43C) de cinza volante.  
Fonte: Consoli et al. (2011)

As equações 21, 22 e 23, mostram os resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e o teor volumétrico da cal para 0%, 12,5% e 25% de cinza volante volante, respectivamente:

$$q_u = 1,50 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{\eta}{(L_V)^{0,12}} \right)^{-4,58} \quad (21)$$

$$q_u = 1,55 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{\eta}{(L_V)^{0,12}} \right)^{-4,58} \quad (22)$$

$$q_u = 3,44 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{\eta}{(L_V)^{0,12}} \right)^{-4,58} \quad (23)$$

onde:

$$L_V = \left( \frac{V_{cal}}{V_T} \right) \cdot 100$$

$L_V$  = teor volumétrico da cal (%)

$V_{cal}$  = volume da cal (m<sup>3</sup>);

$V_T$  = volume total da amostra (m<sup>3</sup>)

Os resultados mostram que o ajuste dos pontos para relação porosidade e teor volumétrico o expoente interno para todas as equações é -0,12, enquanto que o ajuste de todas as curvas o expoente externos é de -4,58, mostrando sua independência da porosidade e teor volumétrico da cal. A distinção entre as equações 21, 22 e 23 está no valor do escalar que provavelmente é devido a diferença das misturas devido a variação da quantidade de cinza volante.

Na dissertação de Saldanha (2014), foi estudada a mistura de cinza volante com cal de carbureto. Neste trabalho foram realizados ensaios de compressão simples, variando o teor de cal (5%,10% e 15%), o peso específico aparente seco máximo (energia normal, intermediária e modificada) , o tempo (1, 3 e 7 dias) e a temperatura de cura (40, 60 e 80°C), em câmara úmida.

Nas Figuras 44, 45 e 46 são mostrados o resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e o teor volumétrico da cal, para as temperaturas de cura de 40°C, 60°C e 80°C, respectivamente.



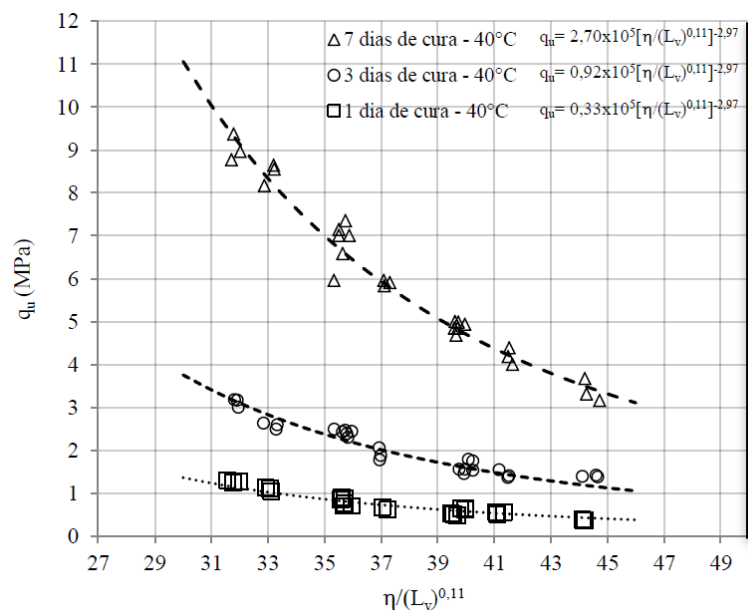


Figura 44 – Resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e o teor volumétrico da cal para temperatura de cura de 40°C

Fonte: Saldanha (2014)

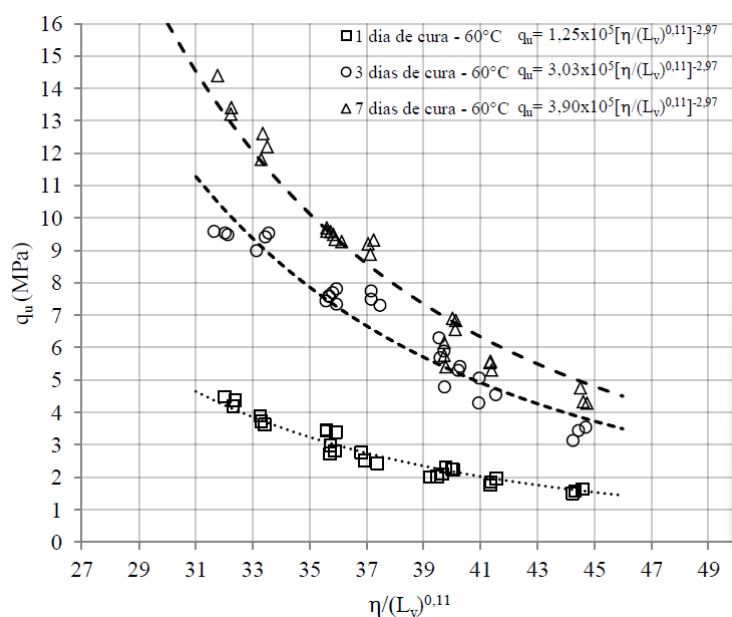


Figura 45 – Resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e o teor volumétrico da cal para temperatura de cura de 60°C

Fonte: Saldanha (2014)

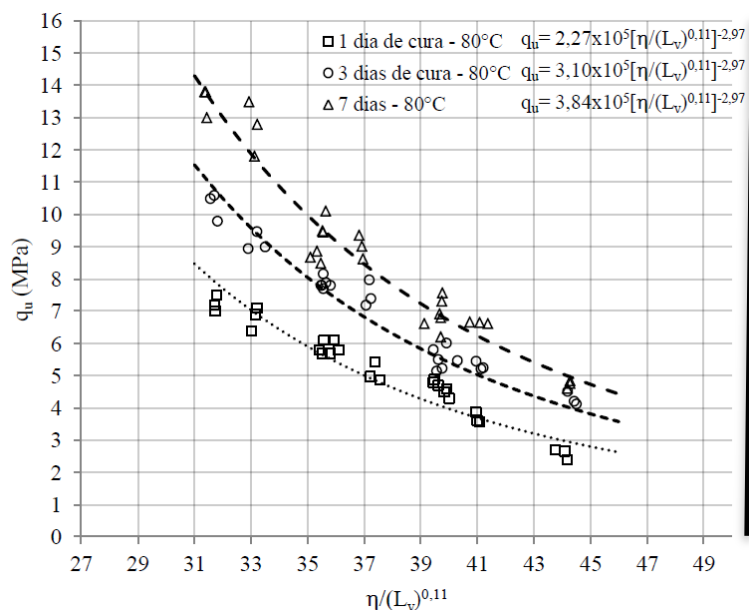


Figura 46 – Resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e o teor volumétrico da cal para temperatura de cura de 80°C

Fonte: Saldanha (2014)

Os resultados das figuras acima mostram que o expoente interno é 0,11 para o ajuste dos pontos dos resultados de resistência à compressão e o expoente externo das equações é -2,97 para todos os tempos e temperaturas de cura, bem como para as quantidades de teor de cal e variação da porosidade que corresponde aos corpos de prova moldados nas energias normal, intermediária e modificada, nos pontos de pesos específicos aparentes secos máximos.

As equações de previsão de resistência à compressão simples ( $q_u$ ), em função da relação da porosidade e teor volumétrico da cal de calbureto, demonstram que os resultados são fortemente influenciados pelo tempo e temperatura de cura.

## 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

### 3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Baseado nas discussões apresentadas nos capítulos anteriores, a metodologia do trabalho realizará um estudo de bancada, com os seguintes objetivos:

- a) realizar ensaio de resistência à compressão, fixando o teor de cal em 10% e variar a quantidade de cinza volante em 20%, 30%, 40%, 50% e 60%, em massa seca, da mistura do CCR, para determinar a melhor quantidade de cinza volante com a finalidade de substituir 100% do cimento Portland do concreto compactado com rolo-CCR;
- b) verificar a influência da variação do teor de cal hidratada (5%, 10%, 15% e 20%) e das energias de compactação (normal, intermediária e modificada) nas propriedades mecânicas da mistura do CCR (compressão simples, compressão diametral), para a mesma quantidade de cinza volante definida no item anterior, denominado de concreto compactado com rolo alternativo ( $CCR_{\text{alternativo}}$ ) e posteriormente verificar a influência da cinza de fundo em substituição a areia da mesma mistura, realizando ensaio de compressão simples;
- c) verificar a influência da relação da porosidade( $\eta$ ) e teor volumétrico de cal ( $L_v$ ) sobre as propriedades mecânicas(resistência à compressão simples e diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático e dinâmico do  $CCR_{\text{alternativo}}$  endurecido, para posteriormente determinar um modelo racional de previsão destas propriedades mecânicas;
- d) realizar ensaio de compressão simples no concreto compactado com rolo convencional( $CCR_{\text{convencional}}$ ), nos seguintes consumos de cimento: 90, 120 e 160kg/m<sup>3</sup>;

- e) verificar a influência da relação da porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico do cimento ( $C_{iv}$ ) sobre os resultados da compressão simples do  $CCR_{convencional}$  para posteriormente determinar um modelo racional de previsão desta propriedade mecânica;
- f) comparar o modelo racional do  $CCR_{convencional}$  com os dois modelos racionais do  $CCR_{alternativo}$ , sendo o primeiro a influência da relação da porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico de cal ( $L_v$ ) e o segundo a influência da relação da porosidade e teor volumétrico da cal e cinza volante ( $B_v$ ), ambos sobre os resultados da resistência à compressão.

Todas as amostras foram coletadas no Município de Candiota-RS, As cinzas volantes e de fundo nos silos de armazenamento da Fase B da Usina Presidente pertencente a Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica – CGTEE. Os agregados graúdos (brita 0 e 1) e a areias nos pátios da Empresa ENTEL. Nas Figuras 47 e 48, estão as fotos da Usina Fase B e o local de coleta das cinzas volante e de fundo, respectivamente. Nas Figuras 49 e 50 indicam os locais de coleta das britas 0 , 1 e areia, respectivamente.

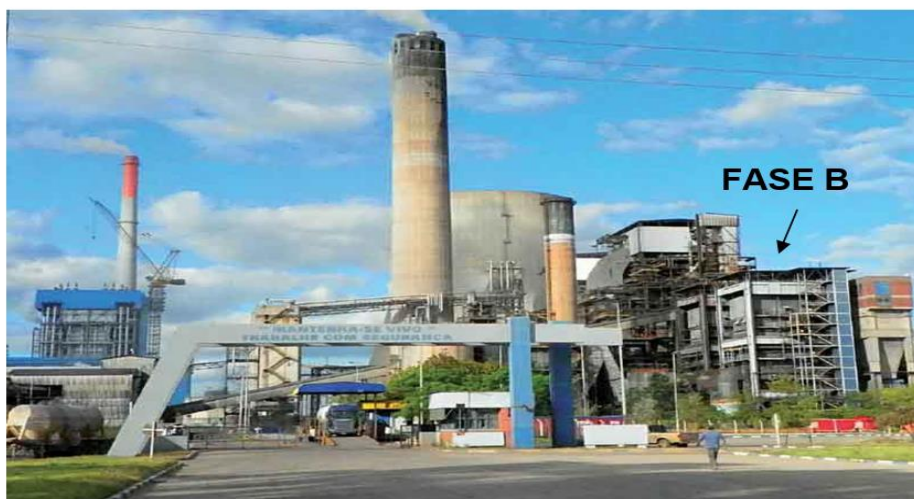


Figura 47 - Termelétrica Presidente Médici - CGTEE  
Fonte: Autor (2017)



Figura 48 – Vista do silo de armazenamento da cinza volante da fase B

Fonte: JCPDS (1999)



Figura 49 - Coleta de amostras de Brita 0 e 1 no depósito da Empresa ENTEL.

Fonte: JCPDS (1999)



Figura 50 - Coleta de amostras da areia no depósito da Empresa ENTEL

Fonte: Autor (2017)

Nos ensaios da cinza de carvão, além dos ensaios de caracterização física convencionais, usados para solos, foram realizados ensaios de caracterização química (fluorescência de raios X), mineralógica (difratometria) e os ensaios de classificação de resíduo, por se tratar como tal.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para o desenvolvimento dos ensaios realizados neste estudo, foram coletados, preparados e caracterizados os materiais a serem utilizados, buscando-se determinar propriedades físicas e químicas dos materiais utilizados, a fim de elucidar possíveis questões relacionadas aos resultados desta pesquisa. Abaixo são mostrados na Figura 51, o fluxograma dos ensaios realizados nos materiais.

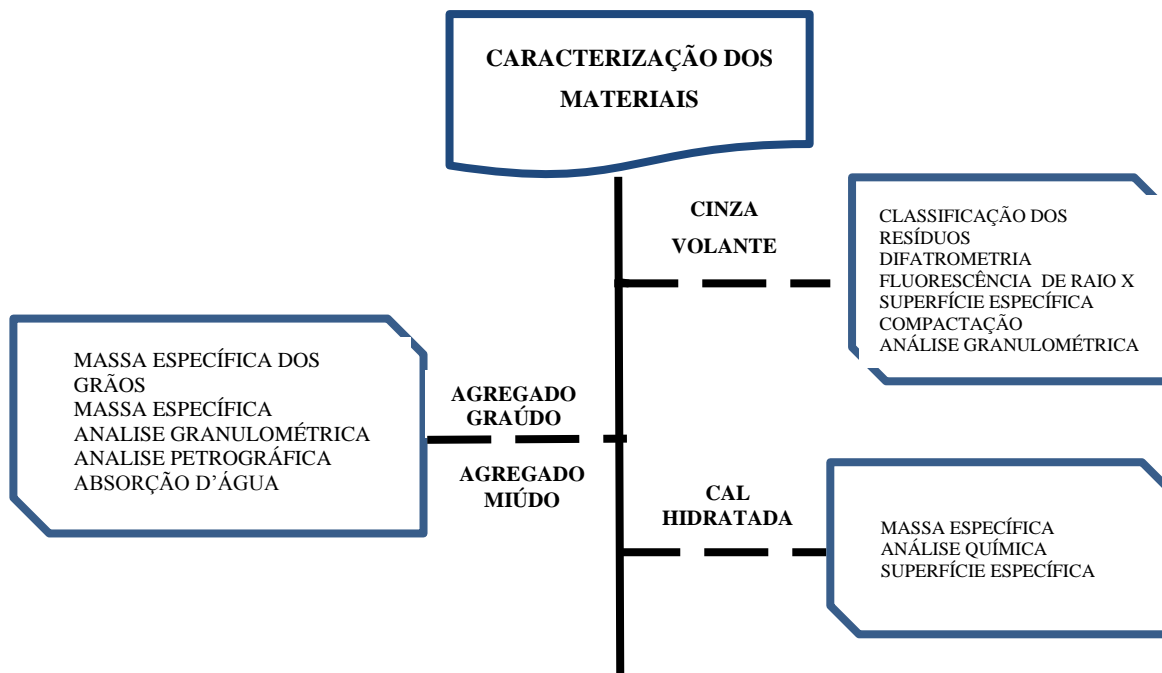


Figura 51 - Fluxograma dos ensaios nos materiais.  
Fonte: Autor (2017)

### 3.2.1 Cimento

Para as misturas em concreto convencional foi utilizado um cimento Portland CP V – ARI, cimento Portland de Alta Resistência Inicial, segundo ABNT NBR 5733:1991. Nas Tabelas 24 e 25 são apresentadas as caracterizações químicas e físicas

Tabela 24 - Caracterização química do cimento CPV-ARI

Caracterização Cimento CPV-ARI	
Características Químicas	
Características	Valor (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,37
SiO <sub>2</sub>	19,05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,77
CaO	60,36
MgO	4,93
SO <sub>3</sub>	2,75
Perda ao Fogo	2,93
CaO <sub>livre</sub>	1,47
Resíduo Insolúvel	0,73
Equivalente Alcalino	0,70

Fonte: NBR 6473 (2003)

Tabela 25 – Caracterização física do cimento CPV-ARI

Caracterização Cimento CPV-ARI		
Características Físicas		
Características	Unidade	Valor
Expansibilidade a quente	mm	0,47
	Início	02:34
Tempo de Pega (h:min.)	Fim	0,13
Consistência Normal	%	29,10
Superfície específica Blaine	m <sup>2</sup> /g	4,27
	#200	%
	#325	%
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	22,0
	3 dias	36,5
	7 dias	42,50
	28 dias	50,30

Fonte: Itambé Cimentos (2014)

### 3.2.2 Cal hidratada

A cal hidratada pode ser classificada em três tipos: CH I, CH II e CH III.

Todos os tipos têm que ser submetidos aos mesmos ensaios mas as exigências de resultados melhores para a cal CH I são maiores do que para a CH II, que exigem mais do que para a CH III. Isto significa que se o consumidor quiser uma cal mais "pura" ele deve adquirir uma CH I, já que para ser definida desta maneira, seus resultados obedecem a limites acima dos exigidos para a CH III. O tipo CH II seria o meio termo.

A NBR 7175:2003, prescreve as exigências físicas para os três tipos de cal, Tabela 26.

Nesta pesquisa foi usada a cal hidratada CH II da marca "**Primor Extra II**". Na Tabela 27 estão os resultados das análises químicas realizadas no Departamento de Química (DEQUIM) da CIENTEC, NBR 6473:2003.



Tabela 26 - Exigências físicas.

Compostos		Limites		
		CH I	CH II	CH III
Anidrido Carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO <sub>t</sub> + MgO <sub>t</sub> )		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: NBR 7175 (2003)

Tabela 27 - Resultados de análise química da cal hidratada.

Determinação	Resultados
Resíduo Insolúvel (RI+SiO <sub>2</sub> ), %	6,6
Óxido de Cálcio (CaO) disponível, %	22,3
Óxido de cálcio total (CaO), %	39,2
Óxido de magnésio (MgO), %	25,3
Perda ao fogo (1000 ± 50°C), %	27,7
Óxido de ferro e alumínio (R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	1,3

Fonte: Autor

### 3.2.3 Caracterização das cinzas volante (fly ash) e de fundo (bottom ash) de carvão

As cinzas volantes foram coletadas diretamente dos precipitadores eletrostáticos, ou seja, sem qualquer tratamento de moagem, a importância em caracterizar a pozolana in natura deve-se ao fato de que o diâmetro de suas partículas estão diretamente ligadas a superfície específica que tem influência nas reações pozolânicas, bem como as cinzas de fundo foram coletadas nos silos de armazenamentos.

Estas cinzas, tem no seu processo de queima, fases cristalina e vítrea que, também, exercem influência na determinação da interação com o óxido de cálcio, bem como sua composição química, onde a quantidade de sílica, alumínio e ferro são importantes na solubilização da fase vítrea e na formação dos compostos hidratados. Portanto, a ampla caracterização nos

materiais com propriedades pozolânicas são importantes registros destes fatores citados acima. Na Figura 52, estão mostradas as fotos das cinzas volante (fly ash) (Figuras 52A) e de fundo (bottom ash) (Figura 52B).



Figura 52 - Fotos das cinzas volante e de fundo da Termelétrica Presidente Médici – fase B

Fonte: Autor (2017)

### 3.2.3.1 Resultados de classificação de resíduos

Segundo a Norma NBR 10004/2004, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- a) resíduos classe I – perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos;
  - resíduos classe II A – Não inertes,
  - resíduos classe II B – Inertes.

Foram avaliados, no laboratório, Química Ambiental, as cinzas volante e de fundo da fase B, da Usina da CGTEE, os seguintes fatores, quanto a **classe I – perigosos** e apresentaram os seguintes resultados:

- a) **Inflamabilidade**  
As amostras não apresentaram a característica de inflamabilidade com os termos referidos na norma;
- b) **Corrosividade**  
As amostras apresentaram, pH= 7,5, não apresentando a característica de corrosividade de acordo com os termos da referida norma;
- c) **Reatividade**

A faixa de pH indicada e os componentes utilizados no processo produtivo, indicam a amostra como não sendo reativa a água;

d) **Toxicidade**

As amostras não apresentaram características de toxicidade com os termos referidos na norma;

e) **Patogenicidade**

As amostras não apresentaram características de patogenicidade de acordo com os termos referidos na norma.

f) **Ensaio de Lixiviação**

Os ensaios de lixiviação foram realizados no laboratório Química Ambiental, segundo procedimentos indicados pela NBR 10005 (2004), com extração da fase sólida com água dionizada na proporção de 1:16. Após a lixiviação as amostras foram filtradas em membrana de éster celulose de 045µm. Na determinação dos elementos traços lixiviados, as cinzas foram digeridas em chapa elétrica com ácido nítrico, perclórico e fluorídrico concentrados, até a eliminação completa do silício. As determinações dos elementos nos lixiviados foram realizados por espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (cádmio, arsênio, selênio), vapor frio (prata) e chama para os demais elementos. O fluoreto foi determinado por potenciometria com eletrodo íon-seletivo.

Os resultados de lixiviação das cinzas volante e de fundo estão apresentados nas Tabelas 28 e 29, respectivamente.

Tabela 28 - Resultados do ensaio de lixiviação das cinzas volantes.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados (mg/L)</b>	<b>LM</b>	<b>LD</b>
Arsênio	0,542	1,0	0,001
Bário	0,106	70,0	0,0015
Cádmio	< 0,05	0,5	0,05
Chumbo	< 0,005	1,0	0,005
Cromo Total	< 0,003	5,0	0,003
Mercúrio	0,008	0,1	0,00015
Prata	< 0,005	5,0	0,05
Fluoreto	0,10	150,0	0,001
Selênio	<0,008	1,0	0,008

Fonte: Autor (2017)

Tabela 29 - Resultados do ensaio de lixiviação de cinza fundo.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados (mg/L)</b>	<b>LM</b>	<b>LD</b>
Arsênio	< 0,03	1,0	0,001
Bário	< 0,6	70,0	0,0015
Cádmio	< 0,007	0,5	0,05
Chumbo	< 0,2	1,0	0,005
Cromo Total	< 0,07	5,0	0,003
Mercúrio	< 0,0007	0,1	0,00015
Prata	< 0,03	5,0	0,05
Fluoreto	0,54	150	0,001
Selênio	< 0,03	1,0	0,008

Fonte: Autor (2017)

LM = Limite Máximo    LD = Limite de Detecção

g) **Ensaio de solubilidade**

Os resultados de solubilização das cinzas volante e de fundo estão apresentados nas Tabelas 30 e 31, respectivamente.

Tabela 30 - Resultados do ensaio de solubilização da cinza volante.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados (mg/L)</b>	<b>LMP</b>	<b>LD</b>
Cloretos	2	250	0,5
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )	93,6	500	0,5
Fluoretos	2,12	1,5	0,01
Sulfatos	55	400	1,0
Nitratos (N)	13,8	10,0	0,05
Fenol	n.d.	0,001	0,01
Surfactantes	0,432	0,5	0,01
Cianetos	<0,001	0,07	0,001
Alumínio	0,732	0,2	0,001
Arsênio	0,254	0,01	0,0015
Bário	<0,05	0,7	0,05
Cádmio	<0,005	0,005	0,005
Chumbo	<0,005	0,01	0,005
Cobre	<0,001	2,0	0,001
Cromo	<0,003	0,05	0,003
Ferro	<0,001	0,3	0,001
Manganês	0,247	0,1	0,0015
Mercúrio	0,0002	0,001	0,0001
Prata	<0,005	0,05	0,05
Selênio	<0,008	0,01	0,01
Sódio	2,0	200	1,0
Zinco	<0,0015	5,0	0,0015

Fonte: Autor (2017)

Tabela 31 - Resultados do ensaio de solubilização da cinza de fundo.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados (mg/L)</b>	<b>LMP</b>	<b>LD</b>
Cloreto	1,2	250	0,5
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )	23,7	500	0,5
Fluoreto	0,18	1,5	0,01
Sulfato	10	400	1,0
Nitrato (N)	<0,5	10,0	0,05
Fenol	n.d.	0,001	0,01
Surfactantes (SAAML)	n.d.	0,2	0,01
Cianeto	<0,02	0,1	0,001
Alumínio	<0,5	0,2	0,001
Arsênio	<0,02	0,05	0,0015
Bário	<0,6	1,0	0,05
Cádmio	<0,007	0,005	0,005
Chumbo	<0,2	0,05	0,005
Cobre	<0,03	1,0	0,001
Cromo	<0,07	0,05	0,003
Ferro	<0,05	0,3	0,001
Manganês	<0,06	0,1	0,0015
Mercúrio	<0,0007	0,001	0,0001
Prata	<0,03	0,05	0,05
Selênio	<0,03	0,01	0,01
Sódio	0,74	200	1,0
Zinco	<0,008	5,0	0,0015

Fonte: Autor (2017)

As cinzas volante e de fundo, são classificadas como resíduos sólidos inorgânicos não perigosos e não inertes – CLASSE 2A, segundo resultados apresentados pelo laboratório Química Ambiental

### 3.2.3.2 Ensaio de Difractometria

As estruturas amorfas, também chamadas de estruturas vítreas são formadas por arranjos atômicos aleatórios e sem simetria ou ordenação de longo alcance. Este tipo de estrutura pode ser encontrada em gases, em líquidos e em certos sólidos, representados basicamente pelos vidros.

Por definição, um material apresenta estrutura amorfa quando o mesmo é resfriado a partir do líquido e exige um aumento contínuo de sua viscosidade. Quando o material atinge uma determinada temperatura, definida como temperatura de transição vítrea ( $T_v$ ), o valor da viscosidade é da ordem de  $10^{12}$  a  $10^{13}$  Poise ( $1\text{poise} = 1\text{N.s/m}^2$ ). Este valor de viscosidade é semelhante a aqueles de materiais no estado sólido. Nesta situação, devido ao limitado movimento atômico, o rearranjo dos átomos não é possível e a cristalização do material não ocorre. Por outro lado, se durante tal resfriamento, a cristalização do material ocorre, a viscosidade do mesmo é abruptamente alterada, atingindo valores próximos de  $10^{12}$  Poise. A Figura 53 apresenta um diagrama esquemático da variação da viscosidade em função da temperatura, para materiais cristalinos e amorfos.

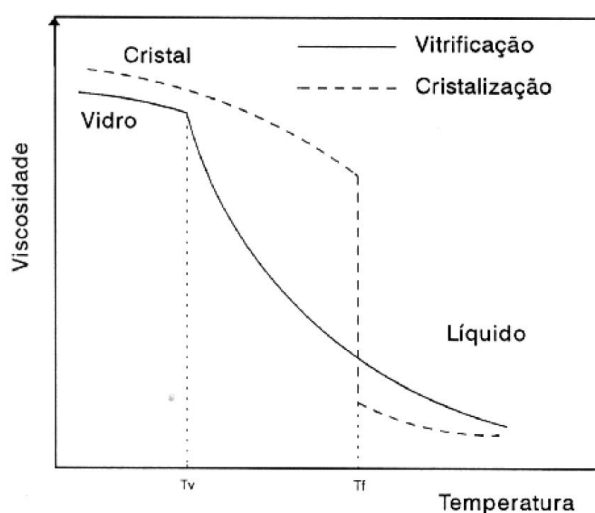


Figura 53 - Variação da viscosidade com a temperatura para materiais cristalinos e vítreos.

Fonte: Autor (2017)

A sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é o exemplo clássico de material que em condições especiais pode exibir o processo de cristalização e formar o quartzo. A Figura 54 mostra as duas estruturas observada da sílica : estrutura cristalina e amorfa.

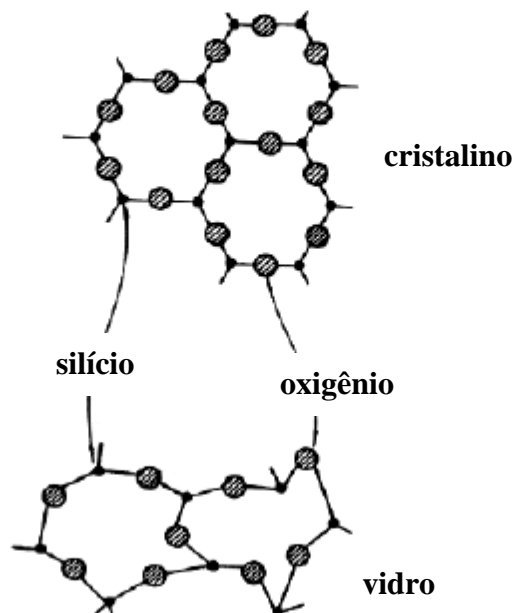


Figura 54 - Diagrama bidimensional das estruturas cristalina e vítrea da sílica

Fonte: Autor (2017)

A identificação das fases cristalinas presentes nas cinzas de carvão foram realizadas em difratômetro de raios-X Rigaku Dengi modelo D-Max 2000 com radiação  $\text{Cu K}\alpha$ , gerada a 30kV e 15mA, e com o auxílio do programa de computador Jade Plus 5 (MDI, 2000) e do banco de dados de padrões de difração (JCPDS, 1999).

As amostras foram preparadas por moagem com álcool em gral de Ágata, na granulometria  $<0,037\text{mm}$  (400# Tyler), e colocadas em porta amostra de vidro (BUHRKE, 2001), e levadas ao DRX. A velocidade de varredura era de  $2^\circ/\text{min}$  para uma varredura angular de 2 a  $80^\circ 2\theta$ .

Para análise quantitativa das fases cristalinas identificadas foi utilizada a metodologia da intensidade relativa ao Coríndon (RIR), quando a intensidade do maior pico de cada fase identificada é medida em relação à intensidade do maior pico do padrão Coríndon adicionado em quantidade pré-estabelecida. Como cinzas de carvão podem conter  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Coríndon), e após criteriosa análise com respeito a superposição de picos (do possível padrão com os das fases a serem analisadas) e de acordo com o método normalizado para determinação da célula



unitária de zeólita NaA e NaX entre outras (ASTM D 3942, 1998), foi escolhido como padrão, Si em pó, padrão de posição de picos de DRX – SRM 640c (NIST, 2000).

Assim sendo, foi necessária a troca da base Coríndon para Si, pela RIR do Si, já que não foi possível a determinação da RIR em relação ao Si para todas as fases cristalinas envolvidas neste trabalho. A relação Si/amostra foi de 1:9 em todos os casos de quantificação.

O conhecimento da composição mineralógica das cinzas, visando a avaliação do potencial de pozolanicidade, é de importância fundamental. Tendo em vista, no entanto, o pouco conhecimento no meio técnico, dos procedimentos e do instrumental que envolvem a identificação dos minerais e os custos elevados, essas técnicas não são usualmente adotadas.

A própria ABNT, através da NBR 12653/2014, especifica para materiais pozolânicos, apenas exigências químicas e físicas quando, na realidade, o potencial de pozolanicidade está mais relacionado com as características mineralógicas.

No presente trabalho, as análises mineralógicas foram realizadas, fundamentalmente, por difração de raios-X. É o método mais utilizado para o reconhecimento de compostos cristalinos. As substâncias amorfas, típicas das cinzas, não podem ser caracterizadas, pois não possuem periodicidade nos arranjos atômicos. A presença de material amorfo, no entanto, pode ser inferida pela formação, no difratograma, do halo de amorfização ou também pela ausência de reflexões.

Os resultados obtidos com as cinzas de fundo estudadas a partir de análises por difratometria de raios-X indicaram a presença de fases cristalinas e amorfas. A fase cristalina é constituída por mulita e quartzo como minerais principais, hematita e magnetita. A mulita tem sua origem decorrente das reações de mulitização da caulinita e ilita-esmectita, associadas ao carvão, no processo de combustão.

O quartzo é um mineral de origem detrítica, infusível nas condições de calcinação das termelétricas. A hematita e a magnetita são decorrentes da oxidação dos sulfetos de ferro na forma de pirita, marcassita e pirrotita.

A fase amorfa pode ser bem evidenciada pelo halo de amorfização conforme mostram os difratogramas. As Figuras 55 e 56, mostram uma grande semelhança, quanto a tipologia dos minerais, entre as cinzas volante e de fundo, respectivamente.

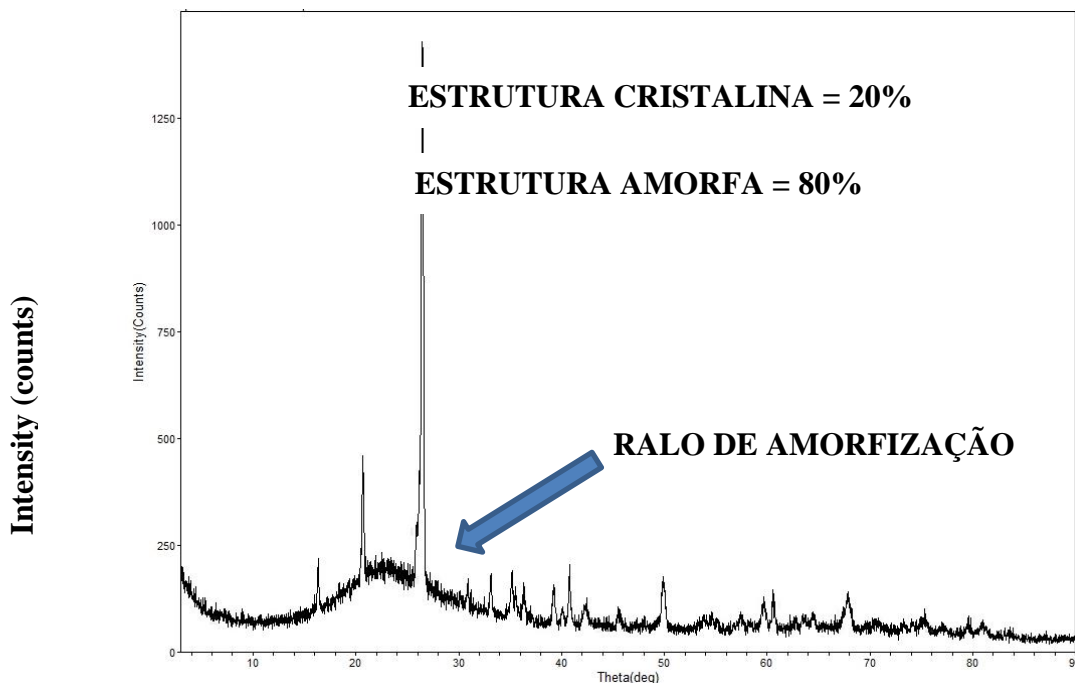


Figura 55 - Resultados do ensaio de difratometria e percentual de estrutura amorfa da cinza volante.

Fonte: Autor (2017)

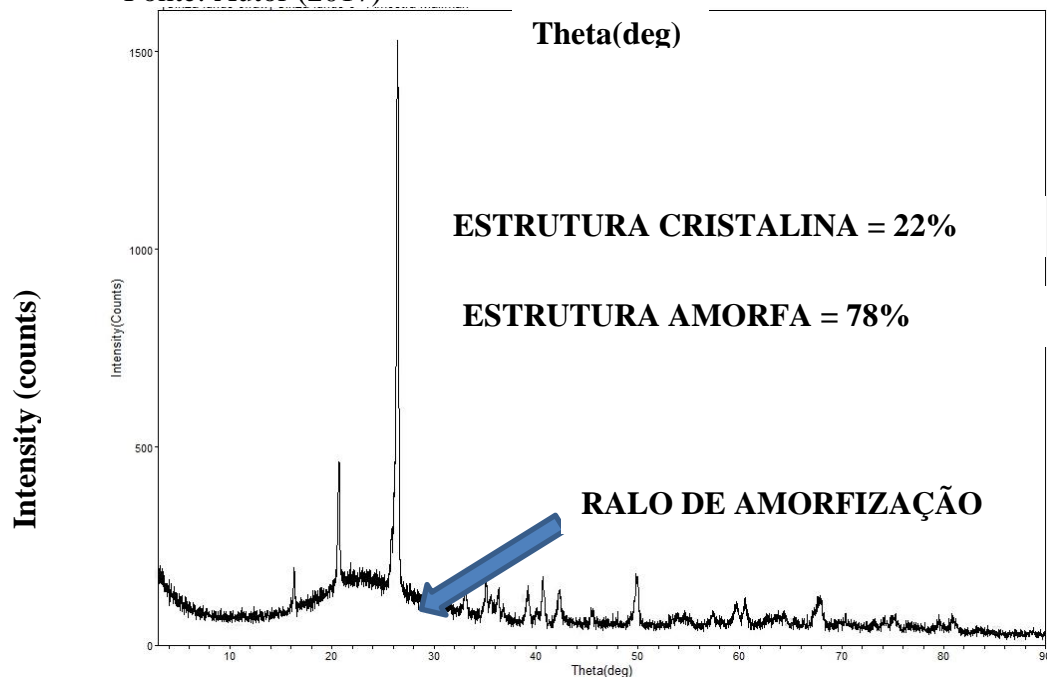


Figura 56 - Resultados do ensaio de difratometria da cinza de fundo e percentual de estrutura amorfa da cinza de fundo.

Fonte: Autor (2017)

Theta(deg)

### 3.2.3.3 Composição química (fluorescência de raio X)

As características químicas das cinzas volante e de fundo estão muito relacionadas com as características dos carvões que lhe dão origem. Tratam-se de carvões cuja matéria orgânica, em grande parte, apresentam-se micro-fragmentada e intimamente misturada a matéria mineral, tornando muito difícil a sua separação e concentração por meios convencionais de beneficiamento de carvão.

Os teores de cinzas resultantes da combustão destes carvões, determinados ao longo de várias décadas, tem revelado uma grande uniformidade, representando aproximadamente 50% da massa do carvão.

Mais de 80% das cinzas de carvão pulverizado consistem de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Óxidos de cálcio, magnésio, sódio, potássio, titânio e outros podem também estar presentes em baixos teores.

A composição química das cinzas volantes foi determinada no Laboratório do DEQUIM de acordo com os procedimentos apresentados nas normas da ASTM D4326-97. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 32 e 33, para as cinzas volante e de fundo, respectivamente.

Tabela 32 - Resultados da composição química da cinza volante.

CONSTITUENTES MAIORES E MENORES	RESULTADOS (%)
Óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ )	65,70
Óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	20,30
Óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ )	0,37
Óxido de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	4,60
Óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ )	1,12
Óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ )	0,46
Óxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	0,11
Óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,10
Óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ )	0,69
Óxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ )	0,38
Perda ao fogo ( $1000^\circ\text{C}$ )	0,52

Fonte: Autor (2017)

Tabela 33 - Resultados da composição química da cinza de fundo.

CONSTITUINTES MAIORES	RESULTADOS (%)
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	66,70
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	19,20
Óxido de cálcio (CaO)	0,60
Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	9,00
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	1,20
Óxido de magnésio (MgO)	0,30
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,13
Óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	0,72
Óxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	<0,05
Perda ao fogo (1000°C)	0,34

Fonte: Autor (2017)

Conforme pode-se deduzir, as cinzas são constituídas predominantemente de silicatos e aluminatos amorfos, com valores de sílica superiores a 60%. Os teores de carvão não queimado são baixos e portanto, a composição química das cinzas reflete, significativamente, a composição geral e a variabilidade da matéria mineral do carvão.

#### 3.2.3.4 Superfície específica BLAINE e BET

A superfície específica pode ser considerada como um parâmetro mais importante do que a distribuição granulométrica, para aplicações em que as propriedades pozolânicas são de importância capital, uma vez que está mais relacionada com a reatividade e com as interações com outras partículas. A superfície específica aumentada, geralmente implica em uma reatividade maior e conseqüentemente uma expectativa de melhores propriedades mecânicas no produto final.

A área específica, conforme preconiza a norma NBR 7224/96 (NBR NM 76/98), foi determinada pelo permeabilímetro Blaine, com o qual é medido o tempo requerido para uma determinada quantidade de ar fluir de uma camada de amostra compactada, de dimensões especificadas e porosidade calculada.

Os valores de superfície específica, da cinza volante, realizados no Departamento de Materiais e Construção Civil – DEMACC, variaram na faixa entre 2500 a 3500 cm<sup>2</sup>/g, método BLAINE Resultados fora desta faixa são excepcionais. Este parâmetro, apesar de não ser

correlacionável com a distribuição granulométrica, é usado, em preferência a este último, como indicador da proporção de finos do material.

Pelo método BET – Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller, publicado em 1938, que baseia-se na adsorção física de moléculas de um gás inerte na superfície externa e interna de todos os poros abertos e interligados das partículas do sólido ensaiado, realizado no Núcleo Orientado para a Inovação da Construção - NORIE da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O resultado da superfície específica da cinza volante foi de 33.000cm<sup>2</sup>/g, que é o mais correto, pela característica da estrutura deste material que contém cenosferas e plenosferas, que são micro-vazios originados do resfriamento das cinzas e como este método considera estas superfícies interna abertas e interligadas o resultado é de quase 10 vezes maior que a determinada no ensaio Blaine.

#### 3.2.3.5 Atividade pozolânica

A reação química da cinza volante com o hidróxido de cálcio, em meio aquoso, resulta na formação de compostos hidratados similares aos do cimento Portland. A diferença entre estes sistemas é que o cimento, ao se hidratar, produz hidróxido de cálcio, como subproduto de reação, enquanto que a cinza volante o consome, por atividade pozolânica.

A reação pozolânica caracteriza-se pela interação vítrea da pozolana com o hidróxido de cálcio, podendo ser resumida da seguinte forma (MASSAZZA, 1998).



Nas pozolanas com composição variável, caso da cinza volante, ocorre reação da sílica, alumina e ferro vítreo, com formação de hidratos distintos, porém de forma análoga, ou seja (MASSAZZA, 1998; FU et al., 2002).

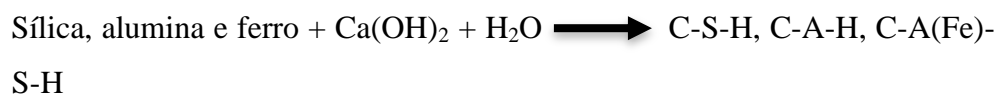
a) Silicato de cálcio hidratado:



b) Silicato de cálcio, aluminato de cálcio e sílico-aluminato de cálcio hidratado:



- c) Silicato de cálcio, aluminato de cálcio e sílico-ferro-aluminato de cálcio hidratado:



Para que estas reações ocorram deve haver a dissolução da sílica, alumina e ferro vítreos na interface com a solução. Esta solubilização depende da alcalinidade da água de mistura (BROWERS; VAN EIJK, 2003).

A fase vítrea da cinza volante é relativamente estável sob a ação de hidróxido de cálcio e a velocidade de solubilização de sua estrutura amorfa neste sistema é bastante lenta, já que a solução saturada tem pH igual a 12,6 à temperatura de 25°C (ANTIOHOS; TSIMAS, 2004; FU et al., 2002; GLASSER, 2003).

A cinza volante e o hidróxido de cálcio quando misturados em meio aquoso, resultam na rápida dissociação iônica do hidróxido de cálcio provendo íons de cálcio e hidroxila para a solução. Os íons de cálcio, positivos, são rapidamente adsorvidos pela superfície da cinza volante (MASSAZZA, 1998).

Na sequência, as hidroxilas atacam a matriz vítrea, composta por  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , destruindo as ligações O-Al e O-Si, formando uma concentração elevada de íons  $\text{SiO}_3^{-2}$  e  $\text{AlO}_2^-$ , em solução, além de liberar íons alcalinos para o meio aquoso ( $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ ), quando presentes na cinza volante (Berry et al., 1994; Fu et al, 2002; Malek et al., 2005). A dissolução dos principais compostos vítreos da cinza volante, em pH maior que 12, ocorre da seguinte forma (BROUWER; VAN EIJK, 2003).



O consumo gradual de cálcio requer a contínua solubilização de hidróxido de cálcio para manter a solução saturada. A incessante reposição de íons de cálcio na solução e a baixa solubilidade dos compostos hidratados são indicadores de que o gel de C-S-H é o primeiro produto intermediário formado (MALEK et al., 2005). Na Tabela 34, estão sendo

apresentados os diferentes compostos hidratados, identificados por diferentes autores, resultante da atividade pozolânica da cinza volante com hidróxido de cálcio (HOPPE FILHO, 2008). Tabela 34 - Compostos hidratados possíveis de serem formados na atividade pozolânica da cinza volante com hidróxido de cálcio

<b>Compostos</b>	<b>Mineral</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Autores</b>
Aluminato de cálcio hidratado	-----	$C_4AH_{13}$	Malek et al. (2005) Massazza (1998) Uchikawa (1986)
Aluminato de cálcio hidratado	Hidrogranada	$C_3AH_6$	Malek et al. (2005) Bienacki et al. (2001) Uchikawa (1986)
Silico-aluminato de cálcio hidratado	Katoita	$C_3ASH_4$	Malek et al. (2005) Bienacki et al. (2001)
Silico-aluminato de cálcio hidratado	Stratlingita	C-S-H	Bentz e Remond (1997) Uchikawa (1986) Malek et al. (2005)
Silicato de cálcio hidratado	-----	C-S-H	Malek et al. (2005) Bienacki et al. (2001) Uchikawa (1986)
Monocarboaluminato de cálcio hidratado	-----	$C_3A.CaCO_3.H_{12}$	Uchikawa (1986) Massazza (1998)

Fonte: Autor (2017)

Foram realizados dois ensaios para verificar a condição de material pozolânico, da cinza volante, através da determinação de atividade pozolânica com cal e com cimento Portland aos 28 dias, prescritos pelas normas NBR 5751:2012 e NBR 5752:2014, respectivamente. Na Tabela 35, estão os resultados de ensaio, bem como as exigências físicas da classe de material pozolânico prescrita na NBR 12653 (2015).

Tabela 35 - Exigências físicas da NBR 12653 (2012) e resultados da cinza volante.

Propriedade	Classe de material pozolânico			Resultados da cinza volante
	N	C	E	
Material retido na peneira 45µm	< 20%	< 20%	< 20%	17,0%
Índice de desempenho cimento Portland aos 28 dias	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	94,6%
Atividade pozolânica com cal aos sete dias(MPa)	≥ 6	≥ 6	≥ 6	7,6

Fonte: Autor (2017)

### 3.2.3.6 Análise granulométrica

A importância da determinação da distribuição da cinza volante está no conhecimento da amplitude da distribuição da dimensão de suas partículas e na frequência com que elas ocorrem. Sua importância na influência de sua atividade pozolânica foi detalhada por Hoppe Filho (2008):

- a) na área específica do material: a moagem da cinza volante libera as partículas das plerosferas e altera a amplitude de diâmetros e a frequência com que eles ocorrem e, conseqüentemente, aumenta a área específica BET;
- b) na reologia: o conhecimento da distribuição granulométrica da cinza volante é interessante para avaliar o empacotamento das partículas, quando em sistema polifásico, e a atuação das forças mássicas e de superfície que preponderam entre as várias partículas presentes no sistema;
- c) no estado fresco: há atuação das partículas como pontos preferencias de nucleação para a precipitação dos compostos hidratados do cimento, estando este efeito relacionado com o diâmetro e a área específica dos grãos.

A distribuição dos tamanhos de grãos é crucial para algumas aplicações como cimentos e concretos e é incluída nas normas e especificações para esses materiais em muitos países europeus e da América do Norte.





Tabela 36 – Dados granulométricos percentuais das cinzas volante e de fundo

Parâmetros	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>
Cinza Volante	3,90µm	11,00 µm	75,00 µm
Cinza de Fundo	38,00 µm	180,00 µm	900,00 µm
Cimento CPV-ARI	2,74 µm	12,00 µm	34,00 µm

Fonte: Autor (2017)

Resultados típicos, determinados no Laboratório de Solos do Departamento de Geotecnia (DEPGEO) da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC), de acordo com as normas da NBR – 7181 (1984), NBR - 6502 (1995), revelam que a cinza volante coletada para o uso neste trabalho de pesquisa, apresenta granulometricamente, 85% de fração silte e 16% de fração areia fina a média, com um coeficiente de uniformidade de 3,5 (material uniforme) e peso específico dos grãos de 20,75 kN/m<sup>3</sup>, enquanto que a cinza de fundo apresenta 23% de fração silte, com coeficiente de uniformidade de 5 (material uniforme), 77% de fração de areia fina a grossa e peso específico dos grãos 20,36 kN/m<sup>3</sup>, Figura 52.

### 3.2.3.7 Compactação nas energias normal, intermediária e modificada da cinza volante

Foi realizado ensaio de compactação na cinza volante “in natura”, nas energias normal, intermediária e modificada, no Laboratório de Solos do DEPGEO de acordo com a norma estabelecida pela NBR – 7182 (1986), para mostrar, os parâmetros de compactação deste material, pois dependendo da mistura que se faça com outros materiais, seja por exemplo, somente com cal hidratada, ou neste caso de nossa pesquisa, com areia, brita 0 e 1, estes valores de peso específico aparente seco da cinza volante, poderá influenciar, muito ou pouco, dependendo, do percentual usado na mistura.

Na Tabela 37 estão os resultados de pesos específicos aparentes secos máximos e teores de umidades ótimos das três energias e na Figura 58 estão plotadas as curvas de compactação, A cinza volante comporta-se como um solo fino onde, geralmente, seus parâmetros de compactação estão nas faixas de 80% a 90% das curvas de grau de saturação.

Tabela 37 - Resultados dos parâmetros de compactação das energias normal, intermediária e modificada da cinza volante.

ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO	PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO	
	PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO MÁXIMO $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	TEOR DE UMIDADE ÓTIMO $\omega_{ót.}$ (%)
NORMAL(EN)	11,28	30,4
INTERMEDIÁRIA(EI)	11,40	29,4
MODIFICADA(EM)	11,50	28,4

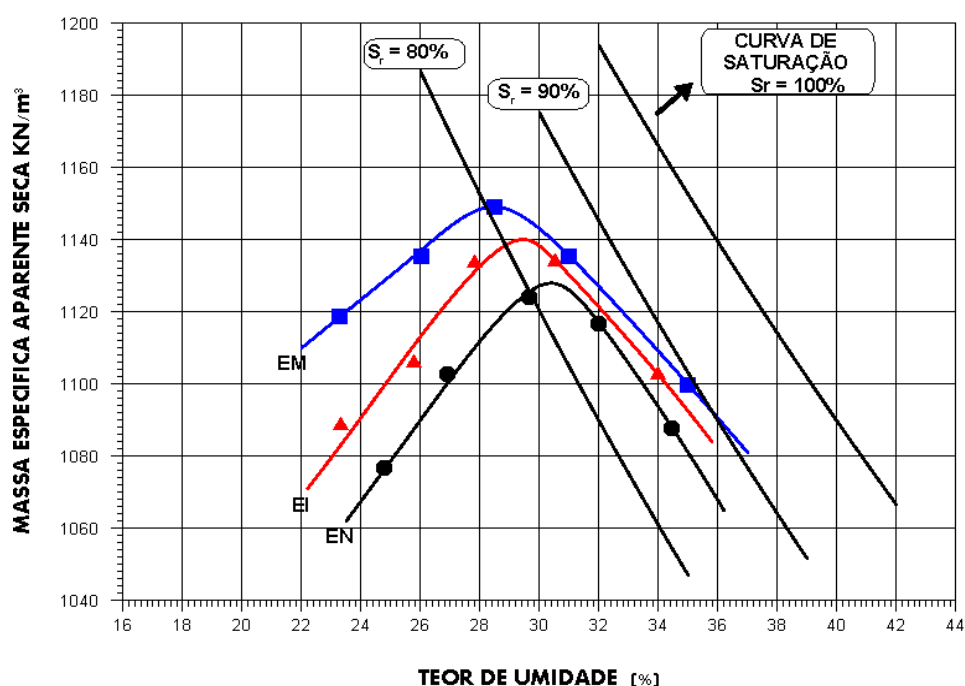


Figura 58 - Curvas de compactação da cinza volante nas energias  
Fonte: Autor (2017)

### 3.2.4 Agregados

Para o emprego dos agregados miúdo e graúdo foram utilizados aqueles localizados na região sul do Estado, pois é área de interesse para aplicação deste Concreto Compactado com Rolo usando, cinza volante. Pontualmente, são agregados próximos a Termelétrica Presidente Médici.

Os agregados naturais utilizados nessa pesquisa consistem em materiais convencionalmente empregados na construção civil da região do município de Candiota. O agregado miúdo é areia originária da jazida Ponte do Império, localizada às margens do Rio Piratini, BR-293, na divisa dos municípios de Arroio Grande - RS e Piratini-RS, Figura 59. Os agregados graúdos são brita 0 e 1 de rocha granítica e sua origem são de jazidas localizadas no município de

Bagé-RS, apresentando dimensão máxima de 19mm. Estes agregados foram adquiridos em função da curva granulométrica sugerida pela literatura e que será mostrada posteriormente. Todos os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Rochas do Departamento de Geotecnia da CIENTEC.



Figura 59 - Localização da origem da areia usada no CCR.  
Fonte: Autor (2017)

### 3.2.4.1 Características do agregado miúdo

#### 3.2.4.1.1 Análise granulométrica

Norma utilizada foi DNIT ME 083/1998. Na Tabela 38 são apresentados os resultados da análise granulométrica do agregado miúdo (areia), usado na mistura do CCR<sub>alternativo</sub>.

Na Figura 60 são apresentados a distribuição granulométrica e as frações, em percentual, das dimensões da partícula de areia, indicando que 92% estão na faixa de areia de fina à grossa. Caracteriza-se por ter suas partículas uniforme, com coeficiente de uniformidade  $C_u = 2,1$ . Figura 61 apresenta a foto da areia utilizada na pesquisa

Tabela 38 - Resultados da análise granulométrica por peneiramento da areia

Peneiras	Material retido	Material		
		Individual (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
Número	(mm)			
n.º 4	4,8	0,0	0,0	100,0
n.º 8	2,4	5,3	5,3	94,7
n.º 10	2,0	0,0	5,3	94,7
n.º 16	1,2	20,0	25,3	74,7
n.º 30	0,6	45,8	71,1	28,9
n.º 50	0,3	25,1	96,2	3,8
n.º 200	0,075	3,4	99,6	0,4
Fundo		0,4	100,0	0,0

Fonte: Autor (2017)

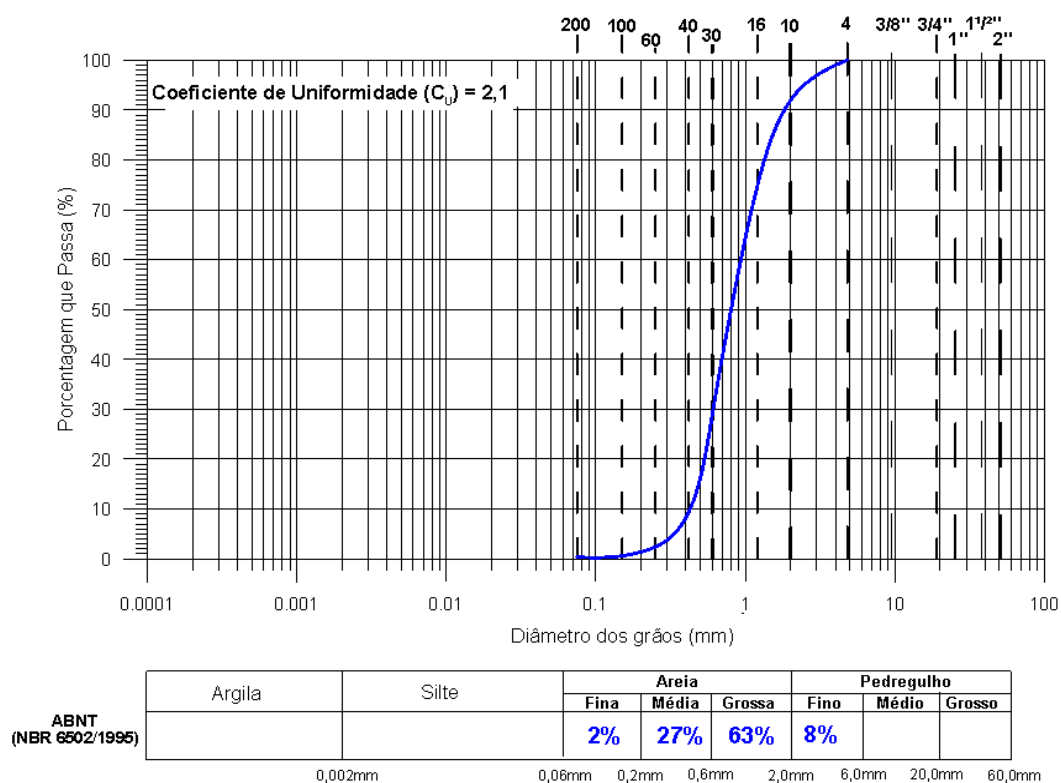


Figura 60 - Curva da análise granulométrica por peneiramento da areia

Fonte: Autor (2017)



Figura 61 - Foto do agregado miúdo (areia) utilizado na pesquisa.  
Fonte: Autor (2017)

#### 3.2.4.1.2 Apreciação petrográfica macroscópica de areia

Norma utilizada, NBR 7389-1:2009. A apreciação petrográfica foi feita utilizando-se lupa binocular Marca WILD-HEERBRUGG, modelo M5A com aumento até 2000X.

A classificação tecnológica é apresentada na Tabela 39.

Tabela 39 - Resultados da apreciação petrográfica.

Peneiras(mm)	Classificação (% em número de grãos)			
	Inócuos	Deletérios	Potencialmente	Friáveis
0,6	85	15	-----	-----
0,3	85	15	-----	-----

Fonte: Autor (2017)

**Cor:** Amostra seca = castanho claro.

**Forma dos grãos :** arredondamento = anguloso; esfericidade = baixa

**Superfície dos grãos:** polida nos grãos de quartzo, além disto, ocorre presença de película de óxido de ferro. Nos grãos de calcedônia ocorre superfície fosca.

### Composição mineralógica (Tabela 38)

Classificação	Minerais/outros (% de ocorrência)
Inócuo	quartzo (100%)
Deletério	calcedônia (100%)

#### 3.2.4.1.3 Peso específico, peso unitário e absorção de água

Os ensaios de peso específico dos grãos, peso unitário e absorção de água e massa unitária foram realizados seguindo as normas, -método do picnômetro para a determinação da massa específica segundo PO 01.007; DNIT ME 195:1997, DAER EL 107:2001, NBR NM 30:2001, respectivamente. Os resultados estão indicados na Tabela 40 abaixo.

Tabela 40 - Resultados do Peso unitário e absorção da areia.

Peso específico dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	Peso unitário (kN/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
26,00	15,00	1,2

Fonte: Autor (2017)

#### 3.2.4.2 Características do agregado graúdo

##### 3.2.4.2.1 Análise granulométrica

Norma utilizada foi DNIT ME 083/1998. Na Tabela 41 e 42 são apresentados os resultados da análise granulométrica dos agregados graúdo, brita 0 e 1, respectivamente, usados na mistura do Concreto Alternativo Compactado com Rolo (CACR).

Tabela 41 - Resultados da análise granulométrica por peneiramento da brita 0

Peneiras Aberturas - mm		Material retido		Material Passante (%)
		Individual (%)	Acumulado (%)	
½"	12,7	0,0	0,0	100,0
3/8"	9,5	7,4	7,4	92,6
¼"	6,3	39,1	46,5	53,5
n.º 4	4,8	21,4	67,9	32,1
n.º 8	2,4	25,8	93,7	6,3
n.º 50	0,3	3,8	97,5	2,5
n.º 200	0,074	1,5	99,0	1,0
Fundo		1,0	100,0	0,0

Fonte: Autor (2017)

Tabela 42 - Resultados da análise granulométrica por peneiramento da brita 0

Peneiras Aberturas - mm		Material retido		Material Passante(%)
		Individual (%)	Acumulado (%)	
1"	25,4	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,1	6,5	6,5	93,5
5/8"	15,9	23,4	30,0	70,0
1/2"	12,7	27,3	57,3	42,7
3/8"	9,5	20,1	77,3	22,7
1/4"	6,3	11,6	88,9	11,1
n.º 4	4,8	2,7	91,6	8,4
n.º 8	2,4	4,1	95,7	4,3
n.º 16	1,2	0,9	96,6	3,4
n.º 30	0,6	0,6	97,2	2,8
n.º 200	0,074	1,9	99,2	0,8
Fundo		0,8	100,0	0,0

Fonte: Autor (2017)

Na Figura 62 são apresentados a distribuição granulométrica e as frações, em percentual, das dimensões das partículas das brita 0 e 1, indicando que na brita 0 e 1, 90% das partículas estão na faixa de pedregulho médio. Caracterizam-se por ter suas partículas uniformes, com coeficientes de uniformidades  $C_u = 3,0$  e  $C_u = 3,2$ , brita 0 e 1, respectivamente. Nas Figuras 63 e 64 são apresentados uma vista das brita 0 e 1, respectivamente, usadas na pesquisa.

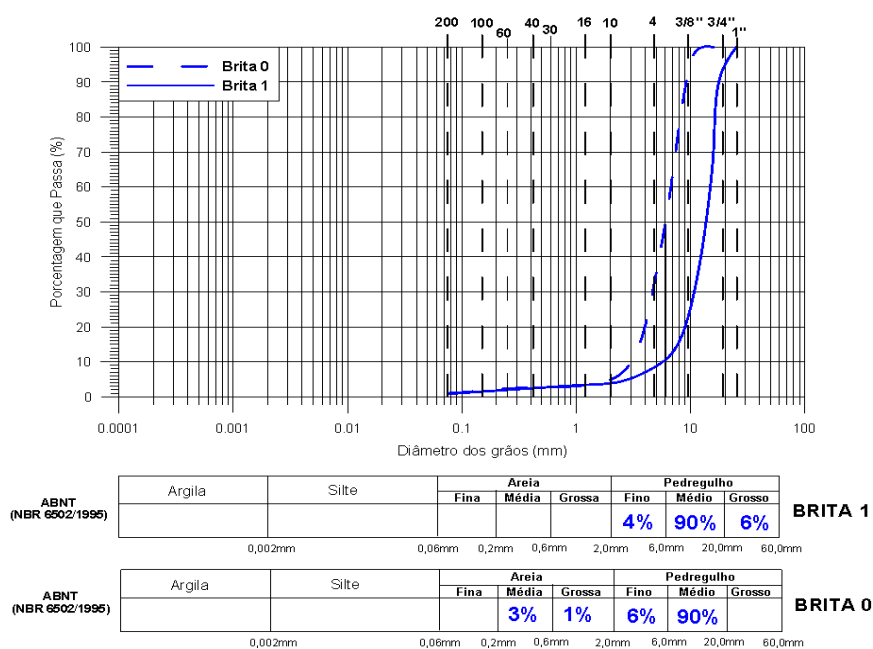


Figura 62 - Curva da análise granulométrica por peneiramento das britas 0 e 1



Fonte: Autor (2017)



Figura 63 - Foto do agregado graúdo (brita 0) utilizado na pesquisa  
Fonte: Autor (2017)



Figura 64 - Foto do agregado graúdo (brita 1) utilizado na pesquisa  
Fonte: Autor (2017)

#### 3.2.4.3 Apreciação petrográfica macroscópica brita 0 e 1.

Apreciação petrográfica macroscópica segundo ABNT NBR 7389-2:2009

**Cor: Amostra seca** = cinza com pigmentação alaranjada;

**Amostra úmida** = cinza escuro;

**Estrutura:** maciça;

**Textura:** equigranular (média);  
**Alteração:** rocha pouco alterada;  
**Teste para ácido clorídrico:** não reativo;  
**Classificação provável:** granito;  
**Propriedades físico-mecânicas:** rocha coerente;  
**Forma dos fragmentos:** lamelar.

#### 3.2.4.4 Peso específico dos grãos, peso unitário, peso específico aparente e absorção de água

Nas Tabelas 43 e 44 estão os resultados de Peso específico dos grãos, Peso unitário e Peso específico aparente, absorção de água, respectivamente.

Tabela 43 - Resultados do Peso específico dos grãos e Peso unitário

Material	Peso específico dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	Peso unitário (kN/m <sup>3</sup> )
Brita 0	26,8	15,0
Brita 1	27,0	13,6

Fonte: Autor (2017)

Tabela 44 - Resultados do Peso específico aparente e absorção de água.

Material	Peso específico aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Brita 0	26,4	0,62
Brita 1	26,4	0,85

Fonte: Autor (2017)

#### 3.2.4.5 Sanidade

Os dois tipos de brita enviados foram repartidos e misturados, antes de iniciar o processo de separação das frações especificadas pelo método de ensaio. O ensaio foi executado fazendo-se a imersão da amostra em solução de sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) anidro e secagem em estufa. Esse procedimento foi repetido 5 vezes.

A perda ponderada por fração e total do ensaio não foi calculada, pois a amostra não apresenta uma granulometria específica (de projeto ou de produção). Seu cálculo, no entanto, pode ser feito, multiplicando-se a perda em massa das frações ensaiadas pela respectiva porcentagem de material retido (obtida de análise granulométrica ou curva granulométrica desejada). Após, somam-se todos os valores obtidos e divide-se por 100. Na Tabela 45 estão apresentados a análise quantitativa na mistura das brita 0 e 1.

Tabela 45 - Análise quantitativa das brita 0 e 1.

Abertura das peneiras (preparação das frações)				Perda em massa (%)
Passado		Retido		
(mm)		(mm)		
63,5	2 1/2"	50,8	2"	-
50,8	2"	38,1	1 1/2"	
38,1	1 1/2"	25,4	1"	0,54
25,4	1"	19,1	3/4"	
19,1	3/4"	12,7	1/2"	0,69
12,7	1/2"	9,5	3/8"	
9,5	3/8"	4,8	n.º 4	1,92
9,5	3/8"	4,8	n.º 4	2,16
4,8	n.º 4	2,4	n.º 8	3,41
2,4	n.º 8	1,2	n.º 16	5,62
1,2	n.º 16	0,6	n.º 30	5,75
0,6	n.º 30	0,3	n.º 50	5,04

Fonte: Autor (2017)

Nota: Análise qualitativa não apresentou nenhuma modificação visual significativa

### 3.2.4.6 Desgaste Los Angeles e índice de forma

Na Tabela 46 estão indicados os resultados dos ensaios desgaste Los Angeles e índice de forma das britas 0 e 1.

Tabela 46 - Resultados de ensaios na brita 0 e 1.

Material	Índice de forma	Desgaste Los Angeles	
		Graduação	Resultados
Brita 1	0,68	B	21
Brita 0	0,85		

Fonte: Autor (2017)

### 3.3 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CINZA VOLANTE NA MISTURA DO CCR<sub>ALTERNATIVO</sub>

Na Figura 65 está apresentado um fluxograma da metodologia para determinar o quantitativo de cinza volante em substituição ao cimento Portland.

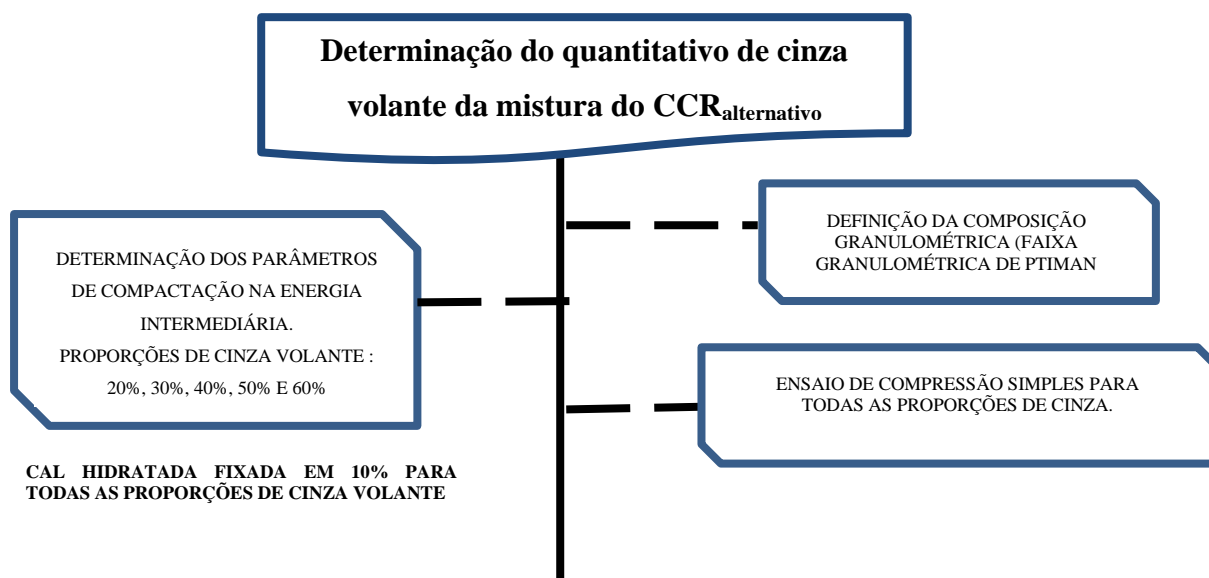


Figura 65 - Fluxograma dos ensaios nos materiais.  
 Fonte: Autor (2017)

#### 3.3.1 Definição da composição Granulométrica para o CCR

Especificamente no Concreto Compactado com Rolo – CCR, não existe uma obrigatoriedade de se trabalhar com uma faixa específica, obedecendo os limites como é o caso de misturas asfálticas. O CCR permite uma maior flexibilidade na definição de sua composição granulométrica, possibilitando a adoção de variadas faixas, exigindo apenas que os limites superiores e inferiores sejam respeitados.

Para se definir a composição granulométrica no CCR devemos saber qual sua aplicação na estrutura do pavimento, por exemplo, se será aplicado como revestimento ou como base e sub-base. Se for para revestimento, a distribuição granulométrica deverá ser mais fechada, para ser mais resistente ao efeito de abrasão e que evite ou minimize a segregação dos materiais (ABREU, 2002). Para base ou sub-base poderá diminuir o consumo de cimento e que atenda as exigências de projeto sendo que, sua composição granulométrica é bem mais maleável, nos aspectos de resistência a abrasão, pois é subjacente a camada de revestimento.

No presente trabalho, utilizou-se a faixa granulométrica idealizada por Ptimann (1998), na qual levou em conta o controle da retração no CCR, tendo uma estrutura granular contínua e densa e requerendo menores teores de ligante hidráulico, sendo sua aplicação para base e sub-base. Esta faixa também foi empregada por Abreu (2002) no estudo de Concreto com Alta Resistência Compactado com Rolo (CARCR), para revestimento de pavimento, Ricci (2007) na utilização de resíduos de construção e demolição (RCD), em CCR para base de pavimentos asfáltico e na tese de doutorado de Taissachet (2012) na utilização de resíduos de fresados asfáltico ou Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), onde sua aplicação foi em substituição a areia (agregado miúdo) ou brita 1 (agregado graúdo) no CCR, para aplicação em base.

A granulometria é estudada para se obter o menor índice de vazios possíveis (TRICHES, 1993), uma vez que tal critério colabora para um ganho de resistência maior (ganho de peso específico aparente seco) e menor consumo de cimento, o que se trata de um critério de economia da obra. De maneira geral, a curva granulométrica do CCR deve ser ajustada em laboratório escolhendo-se a que melhor atenda às especificações técnicas desejadas no projeto de pavimentação (DIAZ, 1993).

Na Figura 66 estão apresentadas a faixa de Pittman com a sua curva média e a curva granulométrica do Concreto Compactado com Rolo alternativo ( $CCR_{\text{alternativo}}$ ) usado na pesquisa. Na Tabela 47 são apresentados os percentuais, em massa, de cada material.

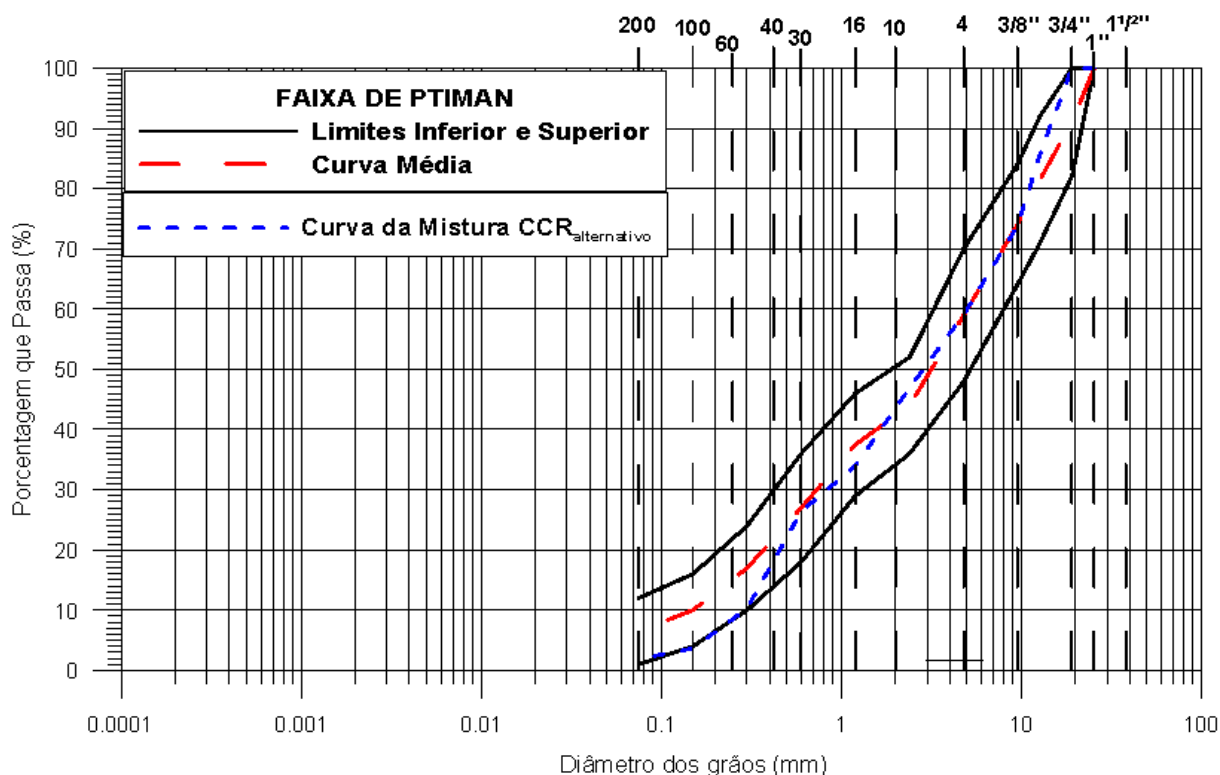


Figura 66 - Faixa de Pittman e distribuição granulométrica da mistura do CCR<sub>alternativo</sub>.

Fonte: Autor (2017)

Tabela 47 - Percentual, em massa, da brita 0, 1 e areia.

BRITA 1	BRITA 0	AREIA
35%	30%	35%

Fonte: Autor (2017)

Na Figura 67 são apresentadas a faixa de Pittman e a distribuição granulométrica da mistura CCR<sub>alternativo</sub>, substituindo 100% do agregado miúdo (areia), pela cinza de fundo, bem como na Tabela 48, o percentual, em massa, de cada material constituinte desta mistura.

Tabela 48 - Percentual, em massa, da brita 0, 1 e cinza de fundo.

BRITA 1	BRITA 0	CINZA DE FUNDO
36%	35%	29%

Fonte: Autor (2017)

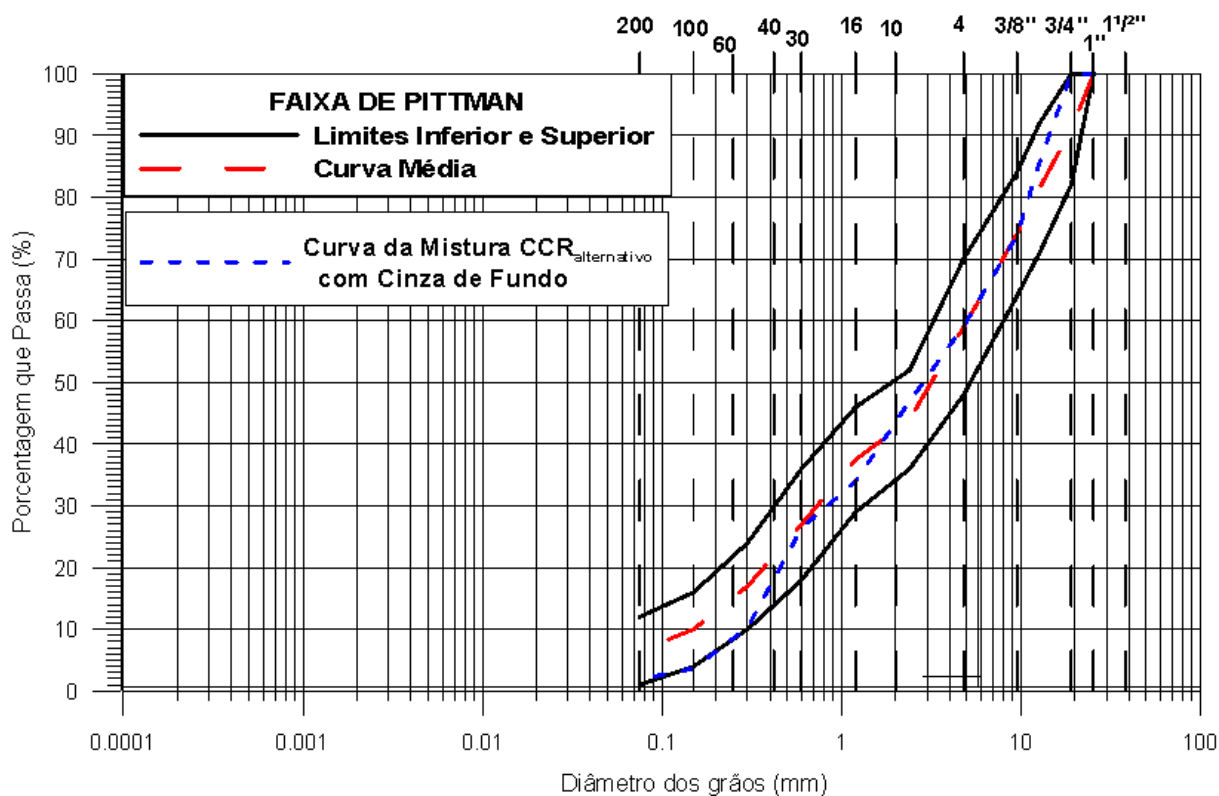


Figura 67 - Faixa de Pittman e distribuição granulométrica da mistura  $CCR_{\text{alternativo}}$ , com cinza de fundo  
 Fonte: Autor (2017)

### 3.3.2 Determinação dos parâmetros de compactação da cinza volante para o $CCR_{\text{alternativo}}$ .

A determinação da melhor quantidade de cinza no Concreto Compactado com Rolo Alternativo -  $CCR_{\text{alternativo}}$ , iniciou com os seguintes percentuais de cinza volante, em massa seca em relação a mistura: 20%, 30%, 40%, 50% e 60%. A cal hidratada foi fixada em 10%, para que somente a cinza volante fosse responsável pela variabilidade do comportamento mecânico, entre os dois materiais e também, baseado nos estudos realizados na CIENTEC, em 1982, com aplicação em base de pavimento, onde as misturas se constituíram de cinza volante, cal hidratada e/ou solo, **Projeto CICASOL**, mostrou que o teor de 10% de cal hidratada, em média, obteve bons resultados no comportamento mecânico (compressão simples, diametral e módulo de elasticidade), para pavimento com tráfego pesado.

Na Figura 68, são apresentadas as curvas de compactação, na energia intermediária das misturas  $CCR_{\text{alternativo}}$ , Na Tabela 49 estão os resultados dos parâmetros de compactação das curvas mostradas na Figura 68.

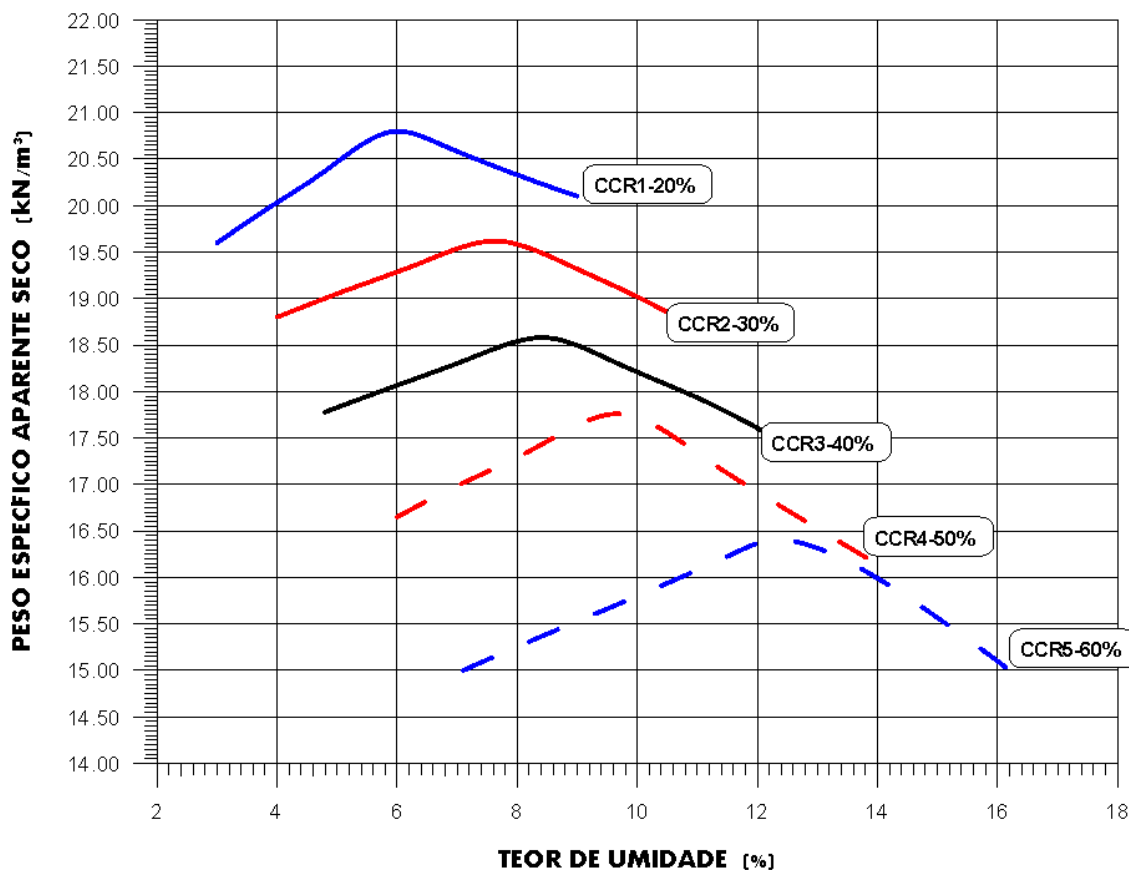


Figura 68 - Curvas de compactação das mistura de CCR<sub>alternativa</sub>, usando cinza volante nas quantidades de 20, 30, 40, 50 e 60%  
Fonte: Autor (2017)

Tabela 49 - Parâmetros de compactação do CCR<sub>alternativo</sub>.

Parâmetros de Compactação	Tipo de Mistura				
	CCR1-20%	CCR2-30%	CCR3-40%	CCR4-50%	CCR5-60%
P.E.A. Seco	20,80	19,60	18,60	17,80	16,40
Máximo Unidade ótima (%)	6,00	7,60	8,50	9,70	12,20

Fonte: Autor (2017)

P.E.A. = Peso Específico Aparente

### 3.3.3 Determinação da quantidade de cinza volante para a mistura do CCR<sub>alternativo</sub>

Foram realizados ensaios de compressão simples com corpos de prova cilíndricos com 200mm de altura e 100mm de diâmetro, empregando a energia intermediária, a moldagem foi distribuída em oito camadas, por problemas executivos, pois a compactação foi realizada no compactador mecânico, com o peso do soquete de 4,54kg e altura de queda de 30,5cm, Figura



69. Foram moldados três corpos de prova para cada proporção e nos pesos específicos aparentes secos máximos e teores de umidades ótimos. Todos foram curados em câmara úmida, com umidade relativa de 95% e temperatura ambiental de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , no tempo de cura de 30 dias.



Figura 69 - Foto do compactador mecânico e o molde para C.P. de 200 x 100mm

Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 50 estão indicados os resultados do ensaio à compressão simples dos corpos de prova de CCR1-20%, CCR2-30%, CCR3-40%, CCR4-50% e CCR5-60% e na Figura 70 estão plotados os resultados de compressão das misturas. Observa-se que o aumento de cinza volante, fixado a cal em 10%, é diretamente proporcional a resistência à compressão até a quantidade de cinza volante de 50%, onde obteve a maior resistência à compressão, sendo que para 60% a resistência à compressão sofre uma redução, para um tempo de cura de 30 dias. Provavelmente o grande aumento de finos (cinza volante) tem influenciado com a diminuição dos agregados miúdo e graúdo e a relação entre cinza volante: cal hidratada podem ter, também contribuído.

Tabela 50 – Resultados de resistência à compressão das misturas do CCR<sub>alternativo</sub>

Misturas	CCR1-20%	CCR1-30%	CCR1-40%	CCR1-50%	CCR1-60%
Resistência à compressão (MPa)	1,93	2,75	4,60	6,83	4,80

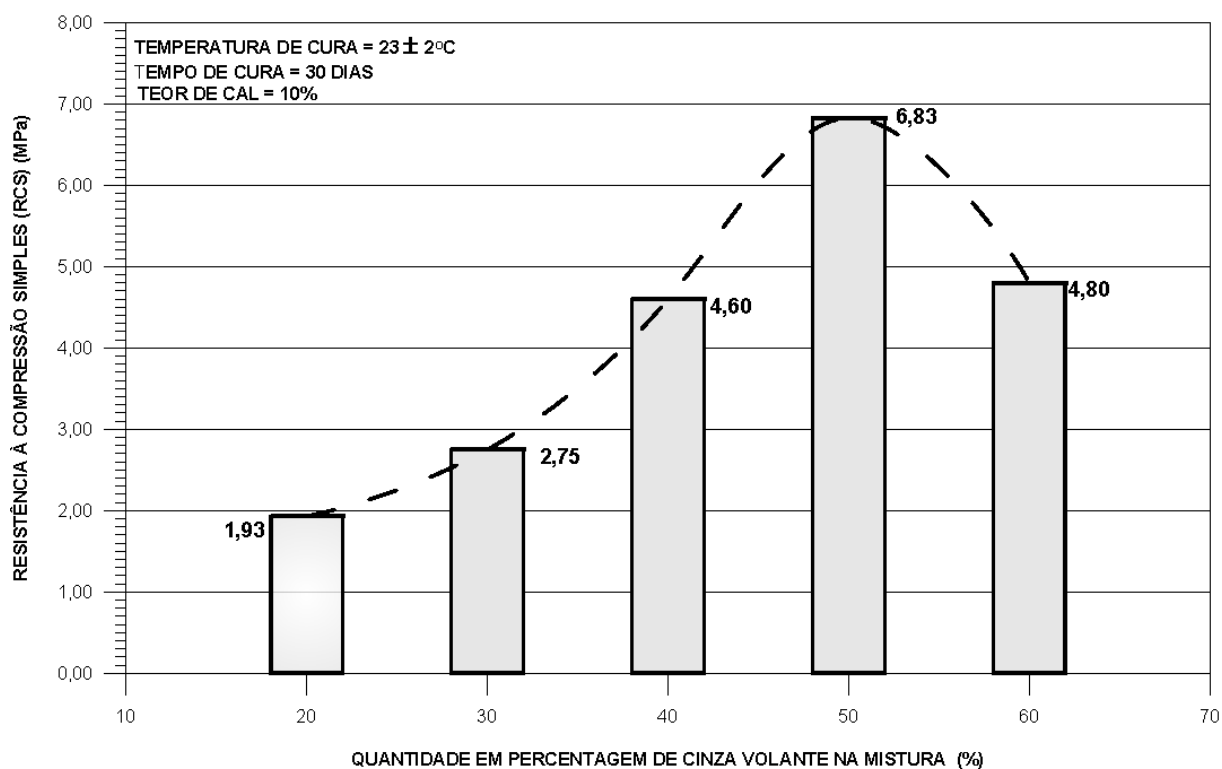


Figura 70 - Resultados de resistência à compressão da quantidade de cinza volante na mistura – cal hidratada fixada em 10%.

Fonte: Autor (2017)

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do comportamento mecânico do CCR<sub>convencional</sub> e CCR<sub>alternativo</sub>. São apresentadas análise e discussão da influência da cinza volante e cal hidratada em substituição ao cimento Portland e a relação da porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico da cal ( $L_v$ ) sobre o comportamento mecânico da mistura do CCR<sub>alternativo</sub> (compressão simples e diametral, resistência à tração na flexão e módulos de elasticidade estático e dinâmico), sem e com cinza de fundo (foi realizado somente compressão simples) substituindo a areia. Também foram realizados ensaios de compressão simples em CCR<sub>convencional</sub>, usando consumos de cimento de 90, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup> e posteriormente foi analisado a influência da relação da porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico do cimento ( $C_{iv}$ ), sobre os resultados de ensaio destas misturas, bem como estes resultados do CCR<sub>convencional</sub> foram comparados com o CCR<sub>alternativo</sub>. Na Figura 71, está apresentado um fluxograma dos ensaios realizados nesta pesquisa.

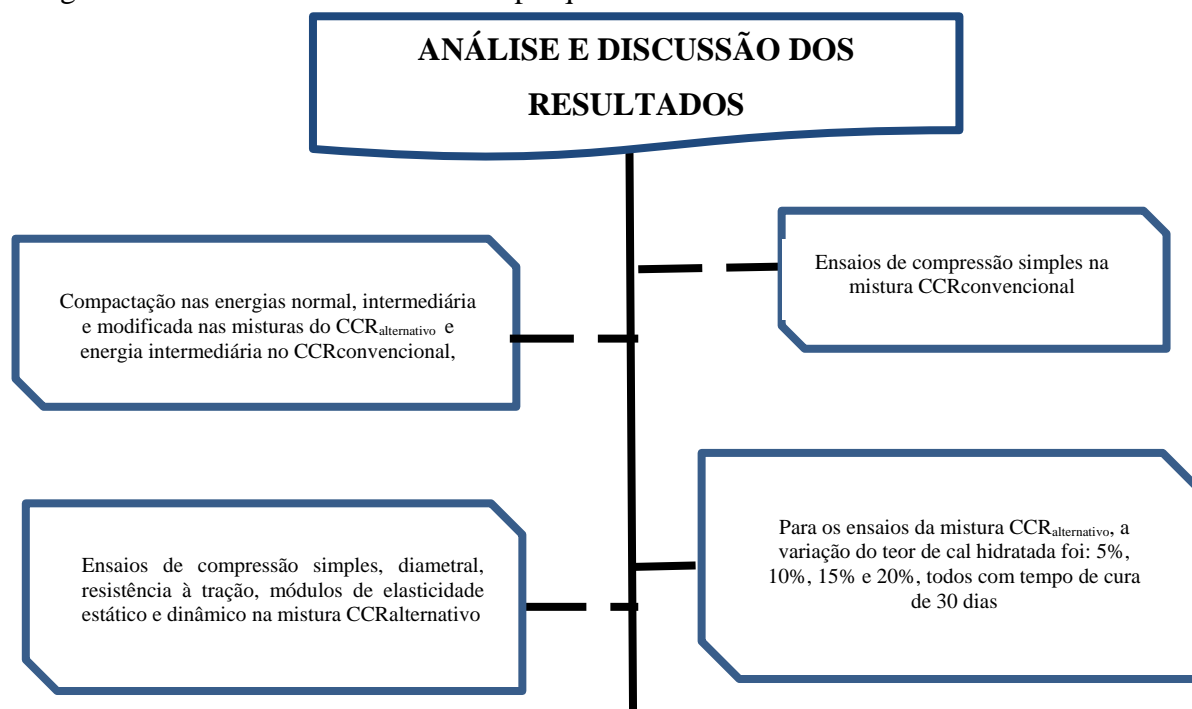


Figura 71 - Fluxograma dos ensaios CCR [Fonte: Autor (2017)]

## 4.1 RESULTADOS DA COMPACTAÇÃO PARA A MISTURA DO CCR<sub>CONVENCIONAL</sub>

Foram realizados ensaios de compactação para o concreto compactado com rolo-CCR, convencional. Foram escolhidos três teores de cimento: 90, 120 e 160kg/m<sup>3</sup>. Estes foram utilizados na tese de doutorado Da Silva (2006), onde cita que, conforme especificação do DNIT, os teores de cimento estipulados para o CCR, está entre 80kg/m<sup>3</sup> e 200kg/m<sup>3</sup>, para camada de base.

Na Figura 72 estão mostradas as curvas de compactação do CCR<sub>convencional</sub>, para os teores de cimento de 90, 120 e 160kg/m<sup>3</sup>, em que as misturas foram compactadas na energia intermediária e na tabela 51 estão os resultados dos parâmetros de compactação.

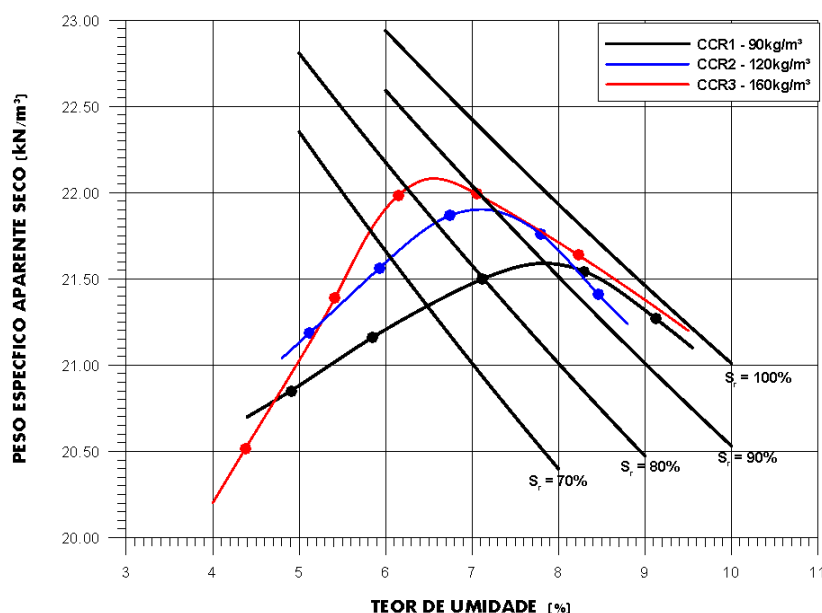


Figura 72 – Curvas de compactação e de grau de saturação do CCR<sub>convencional</sub>  
Fonte: Autor (2017)

Tabela 51 – Parâmetros de compactação do CCR<sub>convencional</sub>

Mistura	Parâmetros de compactação	
	Peso Específico Aparente Seco	Teor de Umidade ótimo (%)
	Máximo (kN/m <sup>3</sup> )	
CCR1-90	22,10	6,6
CCR2-120	21,90	7,0
CCR3-160	21,6	7,8

Fonte: Autor (2017)

Como era de se esperar o aumento de finos, no caso, o cimento, faz diminuir a peso específico aparente seco máximo e aumentar o teor ótimo, mas a diferença entre os resultados das misturas é pouco significativo

#### 4.2 RESULTADOS DAS ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO PARA A MISTURA CCR4-50%<sub>ALTERNATIVA</sub>

Foram realizados ensaios de compactação nas energias normal, intermediária e modificada, com duas finalidades: determinar os parâmetros de compactação ( $\gamma_{d(máx.)}$ ,  $\omega_{(ót.)}$ ), pois os corpos de provas serão moldados nestes pontos e verificar a sua influência no comportamento mecânico da mistura, pois a variação do peso específico aparente seco máximo, significa variação da porosidade. Na Tabela 52 estão, indicados, os percentuais de cada material constituintes do CCR4-50%<sub>alternativo</sub>. Os resultados dos pesos específicos aparentes secos máximos ( $\gamma_{d(máx.)}$ ) e seus teores de umidades ótimos ( $\omega_{(ót.)}$ ), estão apresentados na Tabela 53. Na Figura 73 estão plotadas as curvas de compactação desta mistura, nas três energias: normal, intermediária e modificada, bem como as curvas dos graus de saturação de 70% a 100%.

Tabela 52 - Resultados do percentual, em massa, dos materiais constituintes do CCR4-50%<sub>alternativo</sub>.

MATERIAIS	PERCENTUAL
Cinza Volante + Cal Hidratada	50,0
Areia	16,5
Brita 0	15,2
Brita 1	18,3

Fonte: Autor (2017)

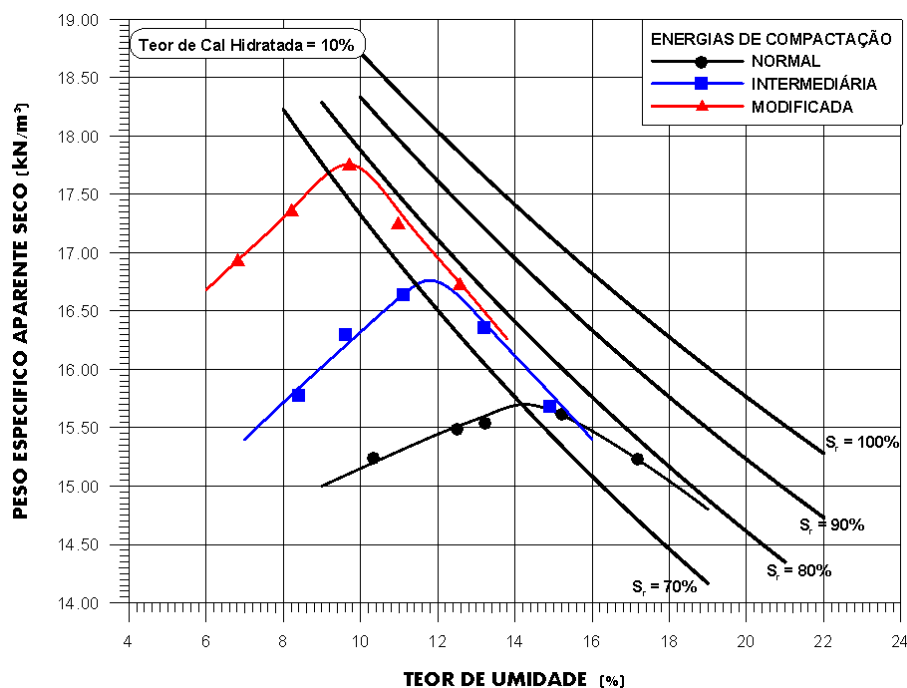


Figura 73 – Curvas de compactação nas três energias para CCR4-50%<sub>alternativo</sub>.

Fonte: Autor (2017)

Tabela 53 - Resultados dos parâmetros de compactação nas três energias de compactação para a mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub>

ENERGIA	PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO	
	P.E.A. SECO MÁXIMO (kN/m <sup>3</sup> )	UMIDADE ÓTIMA (%)
NORMAL	15,70	14,3
INTERMEDIÁRIA	16,75	11,8
MODIFICADA	17,76	9,7

Fonte: Autor (2017)

Na Figura 74, são mostrados as curvas de compactação nas três energias e a curva dos máximos, local onde encontram-se todas os pesos específicos aparentes secos máximos e teores de umidades ótimos, compreendidos entre as energias normal e modificada. Todos os corpos de provas moldados nesta curva dos máximos, por definição, apresentam o menor volume de vazios, isso é, tem a menor porosidade, em relação aos outros pontos das curvas de compactação e a redução da porosidade, dos pontos desta curva, se dá em direção a maior energia de compactação

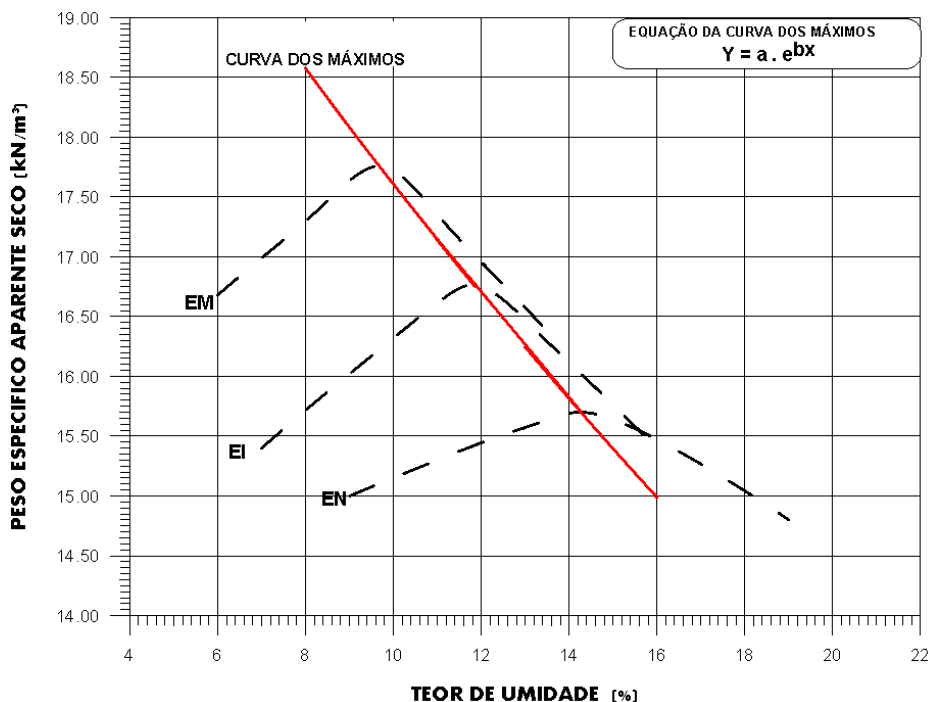


Figura 74 - Curvas de compactação das três energias de compactação e curva dos máximos.

Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 54, a equação 24 representa a curva dos máximos, para o CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, compreendendo valores entre as energias normal e modificada.

Tabela 54 - Equação da curva dos máximos

$$\gamma_{d(\text{máx.})} = a \cdot e^{b W_{\text{ót.}}} \quad (24)$$

$$a = 2,31 \times 10^{+1} \quad b = -2,73 \times 10^{-2}$$

Fonte: Autor (2017)

Segundo Balbo (1996), a estabilização química referente a materiais para a execução de base para pavimento pode se dar de duas maneiras: alterando-se a suscetibilidade de um material à água e conferindo-lhe ganho de resistência como material de construção. No caso do CCR, onde os grãos são maiores que as partículas de cimento, a ação deste ligante hidráulico se restringe a efetuar ligações pontuais entre os grãos, conforme podemos observar na Figura 63, Balbo (1996), isso porque este tipo de concreto seco possui quantidade insuficiente de cimento para o completo envolvimento dos agregados, como ocorre nos concretos plástico.

Estas ligações pontuais implicam a grande quantidade de vazios não preenchidos, isto é, elevada porosidade.

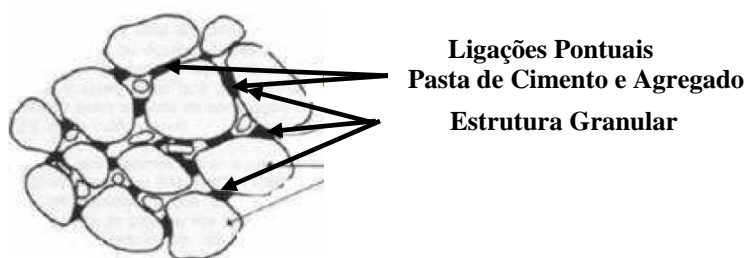


Figura 75 – Estrutura interna do CCR  
Fonte: Balbo (1996)

Neste trabalho a cinza volante e a cal hidratada substituem o cimento Portland, a finalidade é que com a mistura destes dois materiais e a água, ocorram reações pozolânicas, com aparecimento de minerais similares a hidratação do cimento Portland, como por exemplo, silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e possivelmente a estrutura interna deste CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, se aproxima ao da Figura 63, e dependendo da quantidade de cinza o ganho de resistência, além da contribuição efeito químico (reação pozolânica), poderá ter uma boa parcela de contribuição do efeito físico, com o preenchimento destas partículas de cinza volante que não reagiram com a cal, que diminuem os vazios da mistura.

Em se tratando de aplicação para CCR, a importância do fator porosidade é significativo, quanto maior a aproximação das partículas, menor será a porosidade. Esta diminuição aumentará a região de contato das reações químicas entre a cinza volante, cal hidratada e água, e como consequência influenciará no ganho de resistência à compressão da mistura.

#### 4.3 RESULTADOS DE ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA DOSAGEM DO CCR4-50% ALTERNATIVO, SUBSTITUINDO AREIA POR CINZA DE FUNDO

A finalidade da inclusão da cinza de fundo é substituir 100% da areia e verificar sua influência no comportamento mecânico da mistura. Foram realizados ensaios de compactação nas energias normal, intermediária e modificada, com a finalidade de determinar os parâmetros de compactação ( $\gamma_{d(máx.)}$ ,  $\omega_{(ót.)}$ ), pois os corpos de prova serão moldados nestes



pontos e verificar a influência da porosidade (variação do peso específico aparente seco máximo) no comportamento mecânico da mistura. Na Tabela 55 estão os percentuais de cada material constituintes do CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, com cinza de fundo.

Na Figura 76 estão plotadas as curvas de compactação nas energias normal (EN), intermediária (EI) e modificada (EM), para a mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub>, com cinza de fundo e na Tabela 56, estão os resultados dos parâmetros de compactação. Fica evidenciado que o aumento dos teores ótimos e a redução dos pesos específicos aparentes secos máximos, em relação a mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub>, sem cinza de fundo, foi o aumento de finos, devido a inclusão da cinza de fundo, onde 76% de suas partículas são menores do que 75 $\mu$ m (peneira #200). Na Figura 77 estão plotados as curvas nas três energias de compactação para as misturas com e sem cinza de fundo.

Tabela 55 - Resultados do percentual na mistura dos materiais constituintes do CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, com cinza de fundo.

MATERIAIS	PERCENTUAL
Cinza Volante + Cal Hidratada	50,0
Cinza de fundo	7,0
Brita 0	21,0
Brita 1	22,0

Fonte: Autor (2017)

Tabela 56 – Resultados dos parâmetros de compactação da mistura CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, com cinza de fundo

PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO		
ENERGIA	Peso Específico Aparente SECO <sub>(MÁXIMO)</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	UMIDADE ÓTIMA (%)
NORMAL	14,90	16,60
INTERMEDIÁRIA	15,40	14,40
MODIFICADA	16,20	12,70

Fonte: Autor (2017)

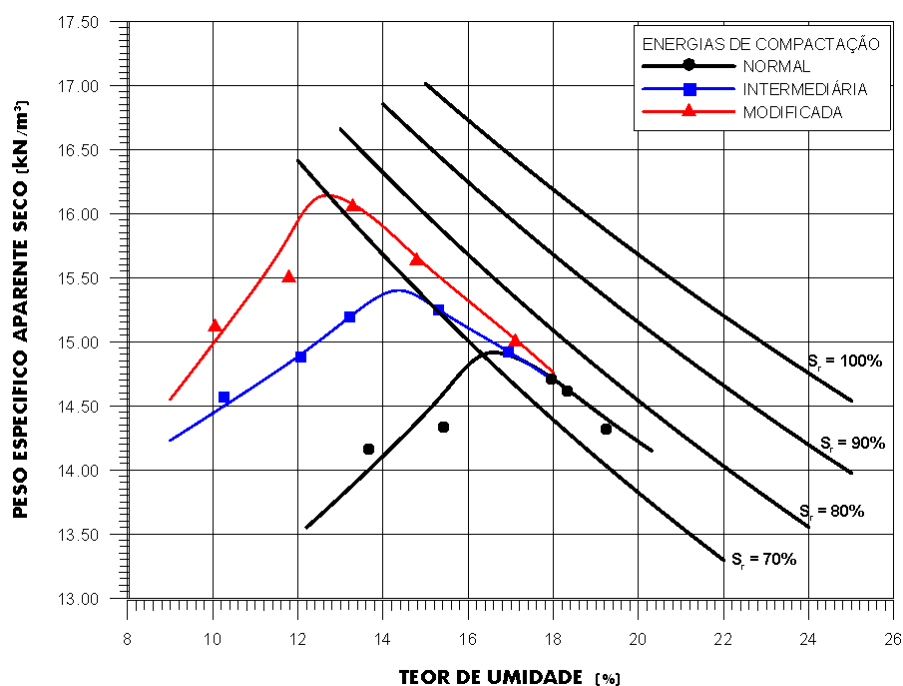


Figura 76 - Curvas de compactação e curvas do grau de saturação com cinza de fundo.

Fonte: Autor (2017)

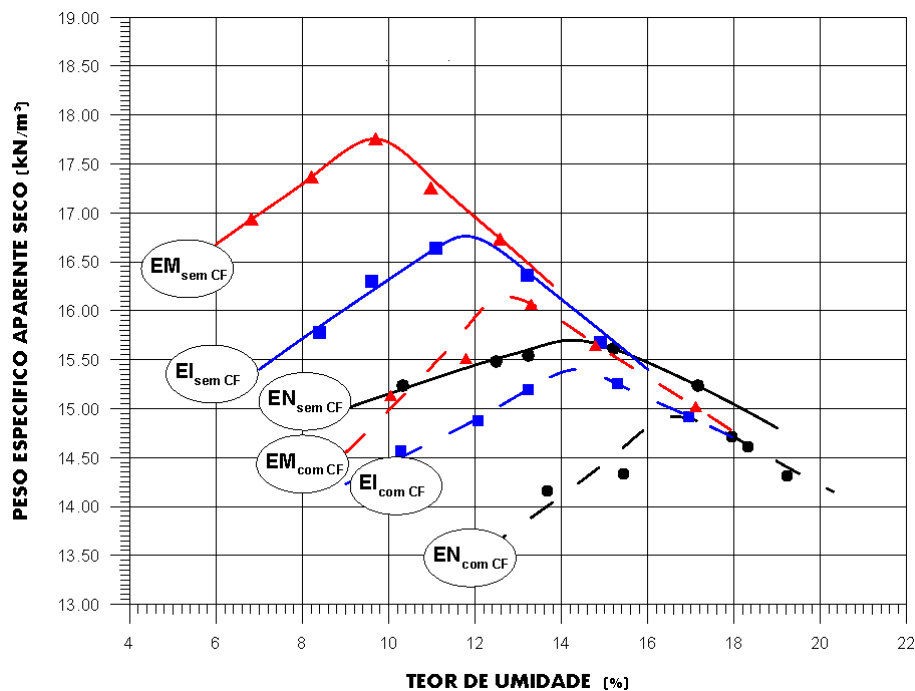


Figura 77 - Curvas de compactação das misturas CCR4-50%<sub>alternativa</sub> sem e com cinza de fundo(CF), nas três energias de compactação.  
Fonte: Autor (2017)

#### 4.4 RESULTADOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E DIAMETRAL DA MISTURA CCR4-50%<sub>ALTERNATIVO</sub>

Tendo em vista a diversidade de condições construtivas e a importância relativa das estruturas em CCR, destinado para camada de base de pavimentos rodoviários, Balbo (2004), recomenda alguns valores típicos para as propriedades do CCR, no estado endurecido, conforme mostrado na Tabela 57.

Tabela 57 – Propriedades mecânicas típicas do CCR para camada de base

Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à Compressão Simples (MPa)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Módulo de Deformação (GPa)
80	5 a 7	0,6 a 1,0	7,4 a 12,6
120	10 a 15	1,2 a 2,2	17,1 a 21,9
160	16 a 23	2,0 a 2,8	20,6 a 24,0

Fonte: Balbo (1996)

Na presente pesquisa não se buscou alcançar esta faixa de valores, sugeridas na Tabela 56, porque estas são aplicadas para base de tráfegos pesado a muito pesado. Esta pesquisa visa a

aplicação para base e sub-base de estradas vicinais(tráfego leve a médio) e para vias urbanas, nas localidades próximas a Termelétrica Presidente Médici.

Para compressão simples e diametral moldaram-se corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100mm de diâmetro e 200mm de altura. Foram compactados nas três energias de compactação: normal (EN), intermediária (EI) e modificada (EM). A moldagem dos corpos de prova por problemas executivos, foram moldados em oito camadas e sendo o volume do cilindro diferente do cilindro de compactação, o número de golpes foi alterado para que os valores das energias de compactação não se alterassem, isso é, EN=5,6kg.cm/cm<sup>3</sup>; EI=12,6kg.cm/cm<sup>3</sup> ; EM=27,4kg.cm/cm<sup>3</sup>.

Para cada energia de compactação foram moldados corpos de prova com os seguintes teores de cal hidratada: 5%, 10%, 15% e 20%. A variação destes dois fatores: energias de compactação (variação da porosidade) e teor de cal, tem como finalidade verificar suas influências nos resultados da compressão simples e diametral. O tempo de cura foi de 30 dias e mantidos numa câmara úmida com temperatura controlada de 23±2°C e umidade relativa mínima de 95%. Na Figura 78 está uma foto desta câmara úmida.



Figura 78 – Câmara úmida com temperatura de 23±2°C e umidade relativa de 95%

Fonte: Autor (2017)

Todos os corpos de prova nos diversos teores de cal foram moldados nos mesmos parâmetros de compactação daqueles apresentados na tabela 53, na qual foi fixado o teor de cal de 10%, pois não é significativa a variação dos resultados do peso específico aparente seco máximo e

umidade ótima, como podemos observar na Figura 79, aplicando energia intermediária de compactação e variando o teor de cal hidratada.

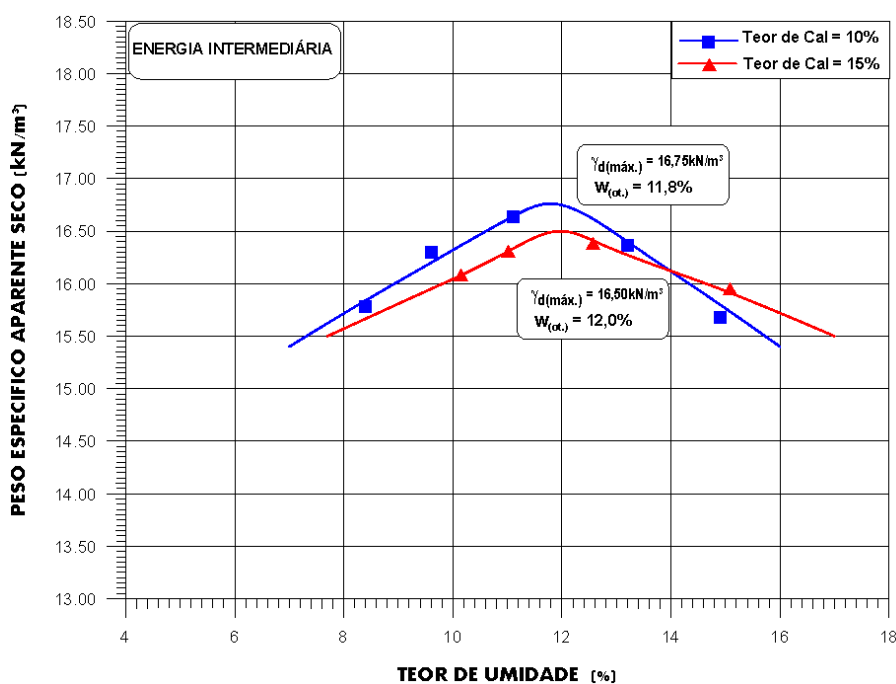


Figura 79 – Curva de compactação, na energia intermediária, com teores de cal 10% e 15% da mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub>  
Fonte: Autor (2017)

Os ensaios de compressão simples e diametral foram executados no Departamento de Materiais e Construção Civil da CIENTEC, obedecendo as normas NBR 5739:2007 e NBR 7222:2011, respectivamente.

#### 4.4.1 Efeitos da variação da Porosidade e Teor de cal Hidratada nos Resultados da Resistência à Compressão simples da mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub>

Na Figura 80 está uma foto do ensaio de compressão simples em corpos de prova da mistura CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, curados aos 30 dias.



Figura 80 – Equipamento para o ensaio de compressão simples  
Fonte: Autor (2017)

Na Figura 81 estão plotados os resultados da resistência à compressão em função da variação da porosidade para cada teor de cal hidratada (5%, 10%, 15% e 20%).

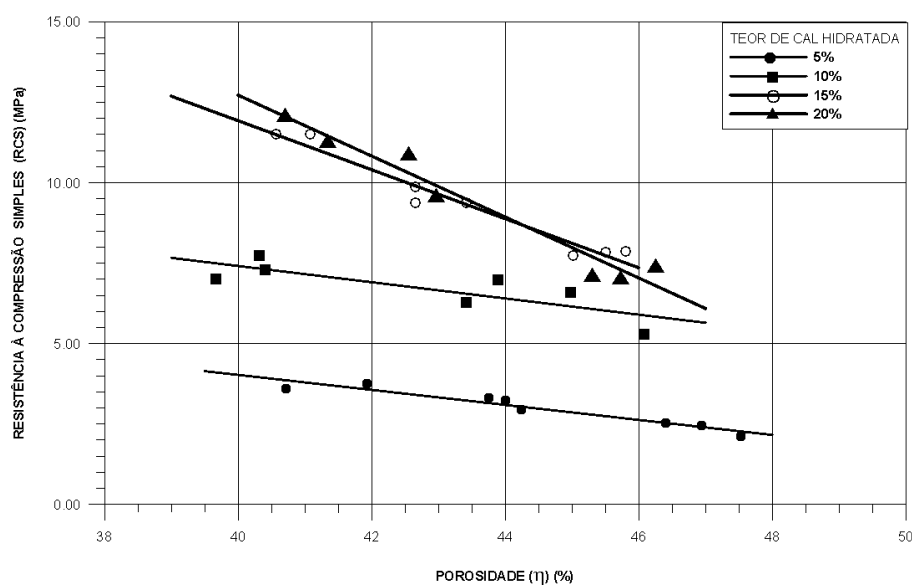


Figura 81 – Resultados de compressão simples em função da porosidade  
Fonte: Autor (2017)

O gráfico da Figura 81, os corpos de prova para cada teor de cal foram moldados nas três energias de compactação e nos parâmetros de compactação ( $\gamma_{d(máx.)}$ ,  $\omega_{(ót.)}$ ).

Os resultados da resistência à compressão, como era de se esperar, são inversamente proporcional a porosidade, mostrando um comportamento linear para todos os teores de cal. Esta influência da porosidade sobre os resultados de resistência é devido ao aumento de energia de compactação onde nos pontos dos máximos ( $\gamma_{d(máx.)}$ ,  $\omega_{(ót.)}$ ) aumenta os contatos dos grãos (efeito físico) fazendo aumentar a resistência à compressão.

Nos resultados que foram adicionados 15% e 20% de cal, o ganhos de resistências foram maiores, possivelmente seja mais significativo a influência das reações pozolânicas que ocorrem entre a cinza volante e a cal hidratada (efeito químico) somado ao efeito físico, trazendo como consequência um ganho maior de resistência se compararmos com as misturas com teores de cal de 5% e 10%.

Analisando a taxa de crescimento da resistência da Figura 81, observa-se que para os teores 5% e 10% é de -0,24MPa/% e para teores de 15% e 20% é de -0,76MPa/% e -0,95MPa/%, respectivamente, sendo que o sinal negativo indica uma relação inversamente proporcional entre a resistência à compressão e a porosidade. Estas taxas de crescimento de resistências maiores para teores de cal de 15% e 20%, só sustenta a observação que nestas duas misturas a influência das reações químicas (reações pozolânicas) foram as grandes responsáveis pelo ganho de resistência.

O comportamento de resistência nas misturas de 15 a 20% de teor da cal, mostram resultados muito próximos, isso é, a influência da porosidade e o aumento do teor de cal, pouco alterou no ganho de resistência. Possivelmente, como a influência maior no ganho de resistência seja devido ao efeito químico, como foi mostrado anteriormente, há um excesso de cal, para esta quantidade de cinza volante, fazendo que não ocorram novas reações pozolânicas, pelo menos neste tempo de cura de 30 dias, que foram rompidos os corpos de prova.

Na Tabela 58 estão indicadas as faixas dos resultados de resistência à compressão da Figura 69 para os teores de cal: 5%, 10%, 15% e 20%.

Tabela 58 – Resultados de resistência à compressão para mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub>

Teores de Cal Hidratada (%)	Resistência à Compressão Simples (MPa)	
5	2,12	3,76
10	4,97	8,04
15	7,07	12,10
20	7,73	11,50

Fonte: Autor (2017)

Na Figura 82 são mostrados os resultados da resistência à compressão em função do teor volumétrico da cal. O teor volumétrico da cal é representado pela seguinte equação 25:

$$L_V = \left( \frac{V_{cal}}{V_T} \right) \times 100 \quad (25)$$

onde:

$L_V$  = Teor Volumétrico da Cal (%);

$V_{cal}$  = Volume da Cal (m<sup>3</sup>);

$V_T$  = Volume Total da amostra (m<sup>3</sup>)

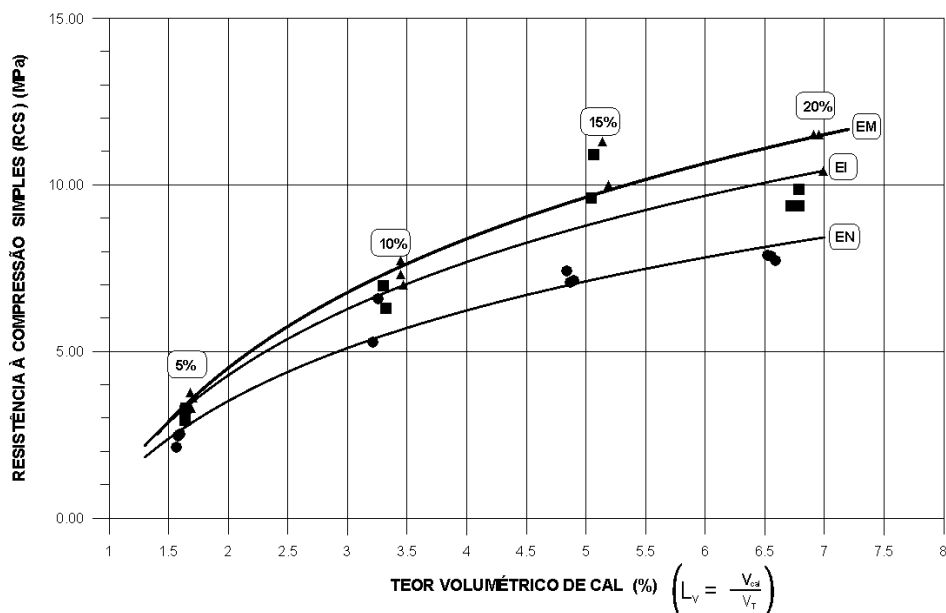


Figura 82 - Resultados da resistência à compressão em função do teor volumétrico da cal

Fonte: Autor (2017)



Este comportamento da resistência à compressão em função do teor volumétrico da cal reforça o comportamento apresentado na Figura 81, onde o ganho de resistência da mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub> é mais significativo, no efeito químico, para teores de cal de 15% e 20%. Em média, o ganho de resistência é 3,6 vezes maior, quando aumentamos o teor de cal de 5% para 20% (efeito químico), para as três energias de compactação. Quando verificamos a influência da porosidade (efeito físico), em média, o ganho de resistência é 1,5 vezes maior quando comparamos corpos de prova moldado na energia normal em relação aqueles moldados na energia modificada, para teor de cal de 20%. O ganho de resistência para outros teores de cal foi menor.

#### 4.4.2 Efeito da relação porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico da cal ( $L_v$ ) na resistência à compressão simples da mistura CCR4-50%<sub>alternativo</sub>

Na Figura 83, são apresentados os resultados da resistência à compressão em função da relação entre a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico da cal ( $L_v$ ). Tal como outros trabalhos que empregaram cimento ou cinza e cal, o expoente interno para ajustar as influências da porosidade e teores de cal, sobre os resultados de resistência, para a mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub> é de 0,3 aplicado no teor volumétrico da cal. Este valor se aproximou aquele usado na tese do Foppa (2005), na qual a mistura foi solo-cimento

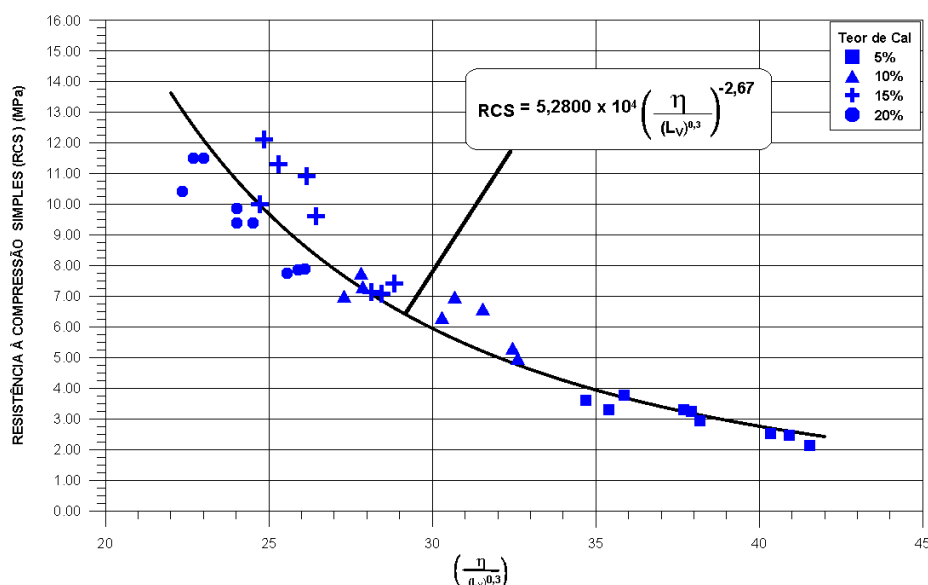


Figura 83 - Correlação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal  
Fonte: Autor (2017)

Esta correlação possibilitou o ajuste de uma curva, , tipo função potência, representada pela equação 26, que apresenta um bom coeficiente de determinação de 0,96. A equação representa a previsão da resistência à compressão simples em função da relação da porosidade e teor volumétrico da cal;

$$RCS = 5,28 \cdot 10^4 \left( \frac{\eta}{L_V^{0,3}} \right)^{-2,67} \quad (26)$$

onde:

RCS = Resistência à compressão simples (MPa);

$\eta$  = porosidade (%);

$L_V$  = Teor Volumétrico da Cal (%);

O valor escalar  $5,28 \times 10^4$ , é influenciado pelo tipo da mistura, tempo e temperatura de cura de cura e tipo de ensaio a ser medido e o expoente -2,67 é o valor determinado para que se formasse uma única equação na relação da porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico da cal.

#### 4.4.3 Efeitos da variação da Porosidade e Teor de cal Hidratada nos Resultados da Resistência à Compressão Diametral da mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub>.

Na Figura 84 está uma foto do ensaio de compressão diametral em corpos de prova da mistura CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, curados aos 30 dias.



Figura 84 – Equipamento do ensaio de compressão diametral  
Fonte: Autor (2017)

Na Figura 85 estão plotados os resultados da resistência à compressão em função da variação da porosidade para cada teor de cal hidratada (5%, 10%, 15% e 20%), para a mistura CCR4-50%<sub>alterativo</sub>.

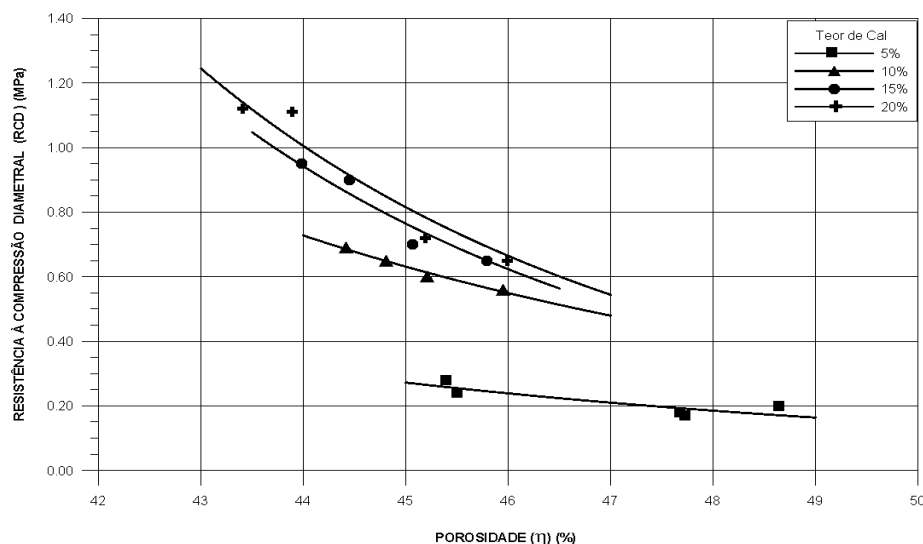


Figura 85 – Resultados da compressão diametral em função da porosidade ( $\eta$ )

Fonte: Autor (2017)

O gráfico da Figura 85 mostra um comportamento muito similar aos resultados de compressão simples em função da porosidade, isto é, para os teores de 15 a 20% o ganho de resistência à compressão diametral é mais significativo nas reações pozolânicas (efeito químico) do que a variação da porosidade (efeito físico), se observarmos a mudança de inclinação das curvas foram maiores nestes dois teores, possivelmente devido as reações pozolânicas, indicando maior ganho de resistência à compressão diametral, bem como, se compararmos os resultados destes dois teores praticamente não foram influenciados pela porosidade e teor da cal pois suas resistências à compressão diametral, ficaram bem próximas, justificando o que foi dito nos resultados de resistência à compressão simples. Na equação 27 mostra uma função potência que melhor se ajustou no comportamento da resistência à compressão diametral em função da porosidade, para todos os teores da cal.

$$RCD = a \left( b \cdot \frac{\eta}{100} \right) \quad (27)$$

onde:

RCD = Resistência à compressão diametral (MPa);

$\eta$  = Porosidade (%);

a e b = constantes que dependem do teor da cal

Na Tabela 59 estão apresentados a faixa de valores de compressão diametral para cada energia de compactação, para o tempo de cura de 30 dias.

Tabela 59 – Resultados de resistência à compressão diametral para mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub>

Teores de Cal Hidratada (%)	Resistência à Compressão Diametral (MPa)
5	0,20 ————— 0,28
10	0,56 ————— 0,65
15	0,65 ————— 0,95
20	0,65 ————— 1,12

Fonte: Autor (2017)

Na Figura 86 são plotados os resultados da resistência à compressão diametral em função do teor volumétrico da cal. Todos os corpos de prova moldados na energia modificada tiveram problemas de trincamento, possivelmente por problemas apresentados em alguns moldes metálicos, onde começaram a apresentar deformação. Repete-se o comportamento semelhante à resistência a compressão simples, onde para teores de cal até 15% e 20%, é bem significativo o ganho de resistência devido a reação pozolânica (efeito químico). A equação 28 foi a que apresentou o melhor ajuste.

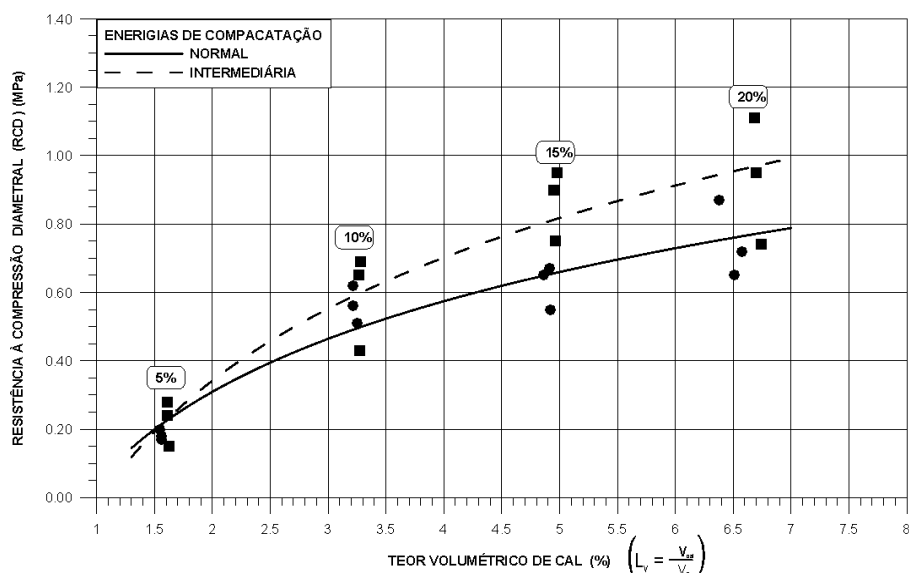


Figura 86 - Resultados da resistência à compressão diametral em função do teor volumétrico da cal

Fonte: Autor (2017)

$$RCD = a + b.l_n(L_v) \quad (28)$$

onde:

RCD = Resistência à compressão Diametral (MPa);

$L_v$  = teor volumétrico da cal(%);

a e b = constantes que dependem do teor da cal

#### 4.4.4 Efeito da relação porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico da cal ( $L_v$ ) na resistência à compressão diametral da mistura CCR4-50%<sub>alternativo</sub>

Na Figura 87 estão plotados resultados de resistência à compressão diametral em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal. Podemos observar que o ajuste da relação da porosidade e do teor volumétrico sobre os resultados da resistência à compressão diametral obtiveram o mesmo expoente interno da resistência à compressão simples que é 0,3, tudo indica que este valor está ligado ao tipo de mistura. Podemos constatar que esta relação da porosidade e teor volumétrico da cal sobre os resultados de resistência à compressão diametral mostra a importância do teor de cal no ganho de resistência, pois este aglomerante é responsável pelas reações pozolânicas, isso é, quanto maior o teor de cal maior são as atividades pozolânicas que são geradas.

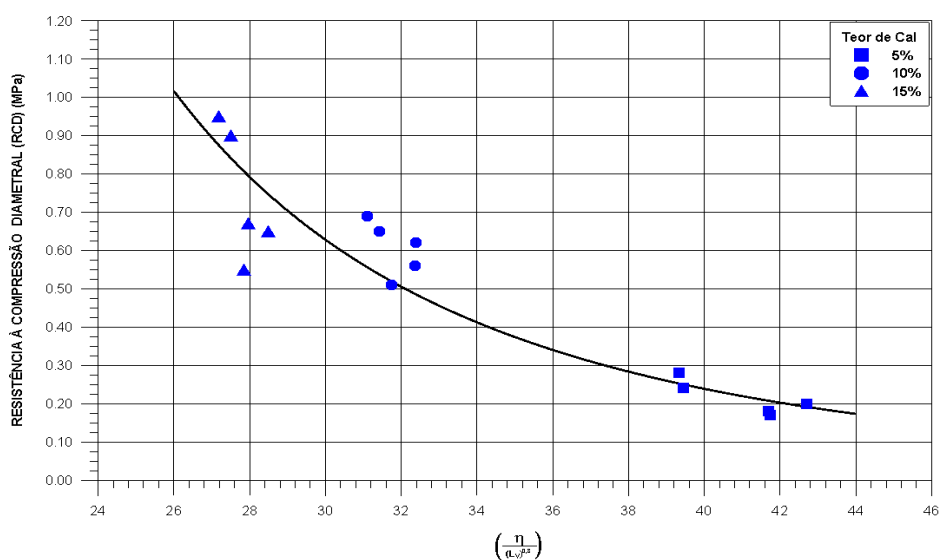


Figura 87 - Correlação da resistência à compressão diametral em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal  
Fonte: Autor (2017)

Esta correlação da Figura 87 possibilitou o ajuste de uma curva, com um modelo matemático do tipo potência, que engloba todos os resultados de compressão diametral em função das variações da porosidade e teor de cal, equação 29.

$$RCD = 5,82 \cdot 10^4 \left( \frac{\eta}{L_v^{0,3}} \right)^{-3,36} \quad (29)$$

onde:

RCD = Resistência à compressão diametral (MPa);

$\eta$  = porosidade (%);

$L_v$  = Teor Volumétrico da Cal (%);

As equações 30 e 31 representam o comportamento das curvas de resistência à compressão simples e diametral, em função da porosidade e teor volumétrico da cal. Na Figura 88 estão plotadas as curvas nas quais o expoente interno e externo da relação porosidade e teor volumétrica da cal para ambos ensaios de compressão simples e diametral é de 0,3 e -2,37.

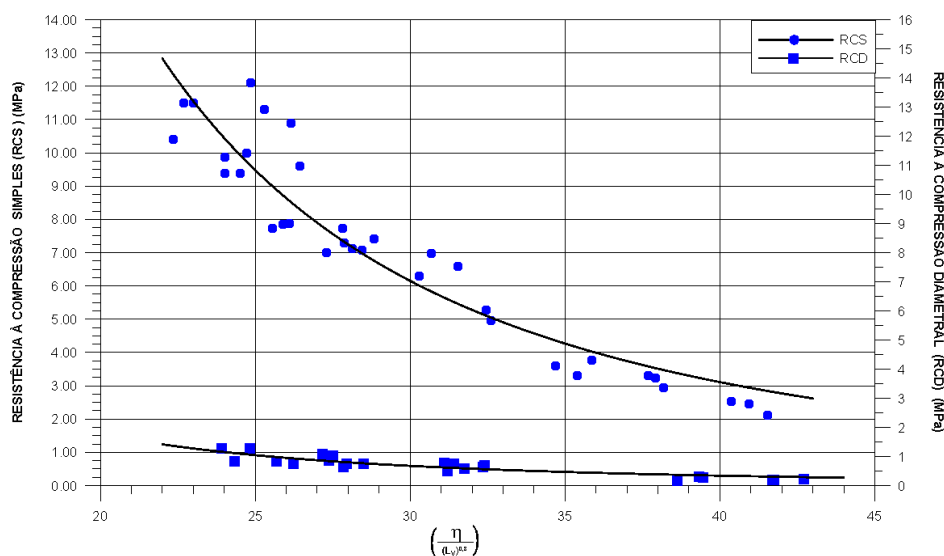


Figura 88 - Correlação da resistência à compressão simples e diametral em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal  
Fonte: Autor (2017)

$$RCS = 1,94 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{\eta}{(L_v)^{0,3}} \right)^{-2,37} \quad (30)$$

$$RCD = 0,19 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{\eta}{(L_v)^{0,3}} \right)^{-2,37} \quad (31)$$

onde:

RCS = Resistência à compressão simples (MPa);

RCD = Resistência à compressão diametral (MPa);

Estas equações indicam que a relação da porosidade e teor volumétrico da cal sob os resultados da resistência à compressão simples e diametral difere apenas nos seus escalares ( $1,94 \times 10^4$  e  $0,19 \times 10^4$ ), que exprimem o tipo de ensaio.

Devido a simplicidade do ensaio de compressão simples, podemos buscar uma relação única entre as equações RCD/RCS, na qual, podemos observar que esta relação é independente da porosidade e do teor volumétrico da cal, equação 32:

$$\beta = \frac{RCD}{RCS} = \frac{0,19 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{\eta}{(Lv)^{0,3}}\right)^{-2,37}}{1,94 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{\eta}{(Lv)^{0,3}}\right)^{-2,37}} = 0,10 \quad (32)$$

O resultado desta relação, entre resistência à compressão simples e diametral está de acordo com os valores encontrados mundialmente nos concretos compactados com rolo-CCR.

#### 4.4.5 Efeitos da variação do teor volumétrico da cal Hidratada nos Resultados da Resistência à Compressão simples da mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub>, com cinza de fundo

A cinza de fundo substituiu a areia (agregado miúdo) em 100%. Na Figura 89 são apresentados os resultados da resistência à compressão simples da mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub>, sem e com uso da cinza, para os teores de cal de 5%, 10% e 15%. No uso de cinza de fundo os corpos de prova foram moldados somente na energia intermediária. Se verificarmos na Figura 76, o valor do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d(máx.)}$ ), na energia intermediária, usando cinza de fundo, na qual foram moldados os corpos de prova, é menor do que o peso específico aparente seco máximo, na energia normal, sem uso da cinza de fundo.

Primeiramente o comportamento da resistência à compressão em função do teor volumétrico da cal (5%, 10% e 15%), se aproxima a uma função linear, distintamente quando os resultados incluíram o teor de 20% de cal na qual os resultados se aproximaram a uma função logarítmica. Possivelmente seja o efeito do teor de cal a 20% onde os resultados da resistência à compressão entre as energias intermediária e modificada praticamente são iguais.

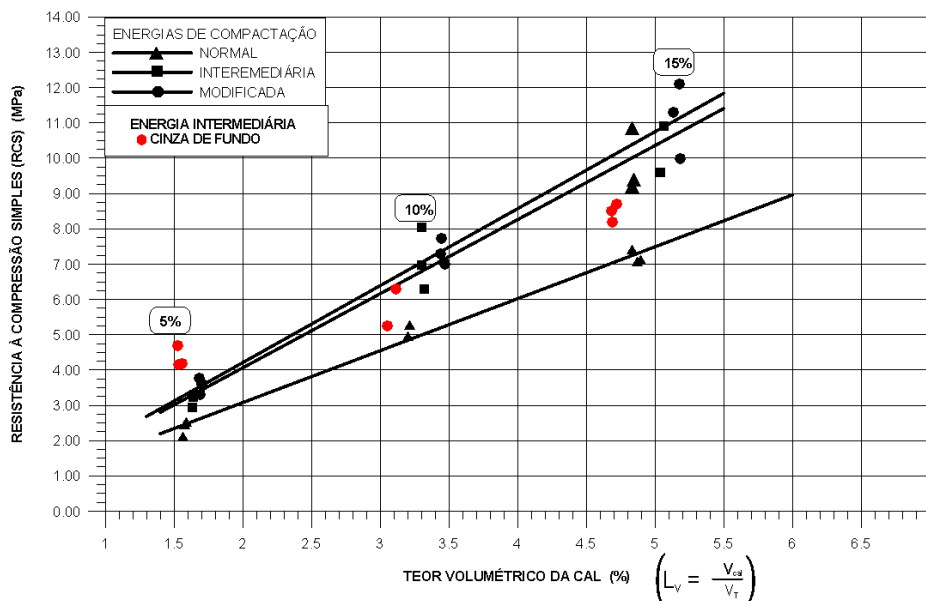


Figura 89 – Comportamento da resistência à compressão em função do teor volumétrico da cal com e sem cinza de fundo.

Fonte: Autor (2017)

A presença de cinza de fundo em substituição a areia, mostra que este material não é inerte, como a areia, possivelmente, pelos resultados apresentados na Figura 89, ela tenha reagido com a cal hidratada. Seus resultados de resistência à compressão, em comparação com os resultados da mistura CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, sem cinza de fundo, se aproximam aos resultados da energia intermediária e modificada, desta mistura, para todos os teores de cal (5%, 10% e 15%), mesmo apresentando um peso específico aparente seco máximo na energia intermediária menor que o peso específico aparente seco máximo na energia normal da mistura CCR4-50%<sub>alternativo</sub>. Isso pode ser um indicativo que a cinza de fundo também reagiu com a cal hidratada.

#### 4.4.6 Efeito da relação porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico da cal ( $L_v$ ) na resistência à compressão diametral da mistura CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, com e sem uso da cinza de fundo

Na Figura 90 é apresentada a curva de previsão da resistência à compressão incluindo a cinza de fundo em substituição a areia. A equação 33 mostra o modelo matemático, e o que difere da mistura CCR4-50%<sub>alternativa</sub> sem cinza de fundo é o valor do escalar. Observou-se uma pequena variação de  $5,82 \times 10^4$  (equação 29) para  $5,73 \times 10^4$ .



$$RCS = 5,73 \cdot 10^4 \left( \frac{\eta}{L_V^{0,3}} \right)^{-2,67} \quad (33)$$

onde:

RCS = Resistência à compressão simples (MPa);

$\eta$  = porosidade (%);

$L_V$  = Teor Volumétrico da Cal (%);

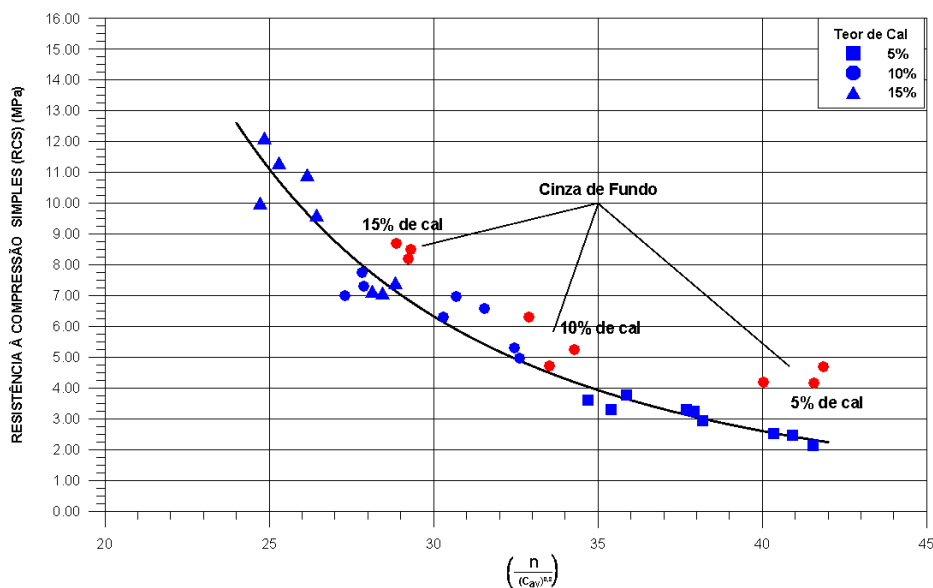


Figura 90 - Correlação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal da mistura CCR4-50% com e sem cinza de fundo

Fonte: Autor (2017)

#### 4.5 RESULTADOS DE COMPRESSÃO SIMPLES DO CCR CONVENCIONAL

Foram realizados ensaios de compressão simples em três misturas no concreto compactado com rolo convencional - CCR<sub>convencional</sub>, compactadas na energia intermediária. Foram utilizados teores de cimento, conforme mostra a Tabela 60. A finalidade é comparar os resultados de resistência à compressão do CCR<sub>convencional</sub> com o CCR<sub>alternativo</sub>. Os corpos de prova foram ensaiados no mesmo tempo e temperatura de cura do CCR<sub>convencional</sub>, pois estes dois fatores influenciam na resistência à compressão.

Tabela 60 – Consumo de cimento usado no CCR<sub>convencional</sub>

Mistura	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
CCR1-90	90
CCR2-120	120
CCR3-160	160

Fonte: Autor (2017)

Na Figura 91 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão do CCR<sub>convencional</sub> e o CCR<sub>alternativo</sub>.

Para o CCR<sub>convencional</sub>, foi verificado a influência da relação da porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico do cimento ( $C_{iv}$ ), equação 34, sobre os resultados da resistência à compressão.

$$C_{iv} = \left( \frac{V_{cimento}}{V_T} \right) \cdot 100 \quad (34)$$

onde:

$C_{iv}$  = Teor volumétrico do cimento (%);

$V_{cimento}$  = volume do cimento (m<sup>3</sup>);

$V_T$  = volume total da amostra (m<sup>3</sup>).

Para o CCR<sub>alternativo</sub>, foi verificado a influência da relação da porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico da cal e cinza volante ( $B_v$ ), equação 35. Como foi incluído o volume da cinza volante no parâmetro  $B_v$ , as misturas do CCR<sub>alternativo</sub>, foram aquelas que se variou a quantidade de cinza volante em 20%, 30%, 40%, 50% e 60%, fixando a cal hidratada em 10% e foram moldados na energia intermediária, no tempo e temperatura de cura de 30 dias e 23±2°C, respectivamente.

$$B_v = \left( \frac{V_{cal} + V_{cinza}}{V_T} \right) \cdot 100 \quad (35)$$

onde:

$B_v$  = Teor volumétrico da cal e cinza volante (%);

$V_{cal}$  = volume da cal (m<sup>3</sup>);

$V_{cinza}$  = volume da cinza volante (m<sup>3</sup>);

$V_T$  = volume total da amostra (m<sup>3</sup>).

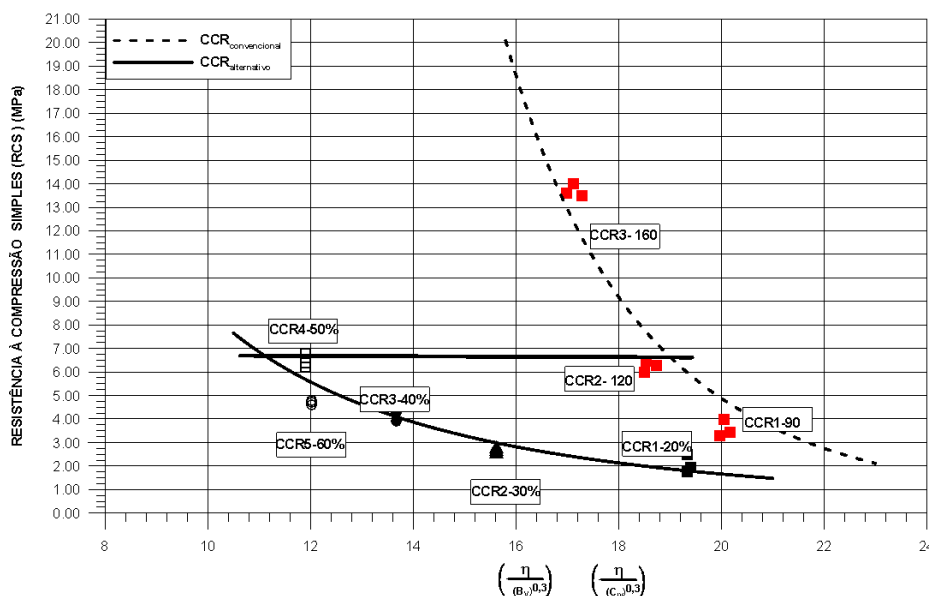


Figura 91 - Correlações da resistência à compressão em função da relação da porosidade e  $C_{iv}$  e  $B_v$   
 Fonte: Autor (2017)

A Figura 91 compara o comportamento da resistência do  $CCR_{convencional}$  e o  $CCR_{alternativo}$ . Se analisarmos puramente os resultados de resistência à compressão sem verificarmos seu comportamento em relação a porosidade e os parâmetros  $B_v$  e  $C_{iv}$ , observamos que a mistura do  $CCR_{alternativo}$  usando 50% de cinza volante alcançou os resultados do  $CCR_{convencional}$  usando teor de cimento de  $120\text{kg/m}^3$ , ambas compactadas na energia normal e com tempo e temperatura de cura de 30 dias e  $23\pm 2^\circ\text{C}$ , respectivamente. Se consideramos que praticamente a mistura com cimento aumentará sua resistência à compressão, muito pouco, ao longo do tempo e é certo que as reações pozolânicas por serem lentas na mistura do  $CCR_{alternativo}$ , continuam a gerar mais minerais com propriedade cimentícias, ao longo do tempo e além disso, estes minerais passarão inicialmente de uma estrutura gel para uma estrutura cristalina, ganharão em resistência à compressão, prevendo que seus resultados serão maiores do que os resultados do  $CCR_{convencional}$  usando teor de cimento de  $120\text{kg/m}^3$ .

Nas equações 36 e 37, são apresentados as previsões de resistência à compressão do  $CCR_{convencional}$  e  $CCR_{alternativo}$ , respectivamente, referente as curvas da Figura 91. Observa-se que o expoente interno para as duas equações é  $-0,3$ . Enquanto que os expoente externos são distintos, provavelmente, foi influenciado pela mudança do aglomerante na qual para o  $CCR_{convencional}$  e  $CCR_{alternativo}$ , os valores foram  $-6,0$  e  $-2,37$ , respectivamente. Os escalares das equações 36 e 37,  $31.150 \times 10^4$  e  $0,24 \times 10^4$ , respectivamente, confirmam a influência do tipo

de aglomerante, bem como as relações de porosidade e teor de cimento estão bem próximas, entre as misturas de teor de cimento de 90, 120 e 160kg/m<sup>3</sup>, pois todas foram compactadas na energia intermediária, enquanto que, mesmos que no CCR<sub>alternativo</sub> todos os corpos de prova foram moldados na energia normal, o diferencial está na variação da quantidade de cinza volante que foi incluída no parâmetro B<sub>v</sub>, foi um dos motivos desta diferença grande entre os escalares.

$$RCS = 31.250 \cdot 10^4 \left( \frac{\eta}{(C_{iv})^{0,3}} \right)^{-6,0} \quad (36)$$

$$RCS = 0,24 \cdot 10^4 \left( \frac{\eta}{(B_v)^{0,3}} \right)^{-2,37} \quad (37)$$

Na Figura 92, são plotados as curvas do CCR<sub>convencional</sub> e o CCR4-50%<sub>alternativo</sub>. Neste caso, para o CCR<sub>alternativo</sub>, foi fixado a proporção de cinza volante em 50% e o teor de cal hidratada variou em 5%, 10%, 15% e 20% bem como os corpos de prova foram moldados nas energias normal, intermediária e modificada. A relação com a porosidade é o teor volumétrico da cal (L<sub>v</sub>), na qual não foi incluído o volume de cinza volante

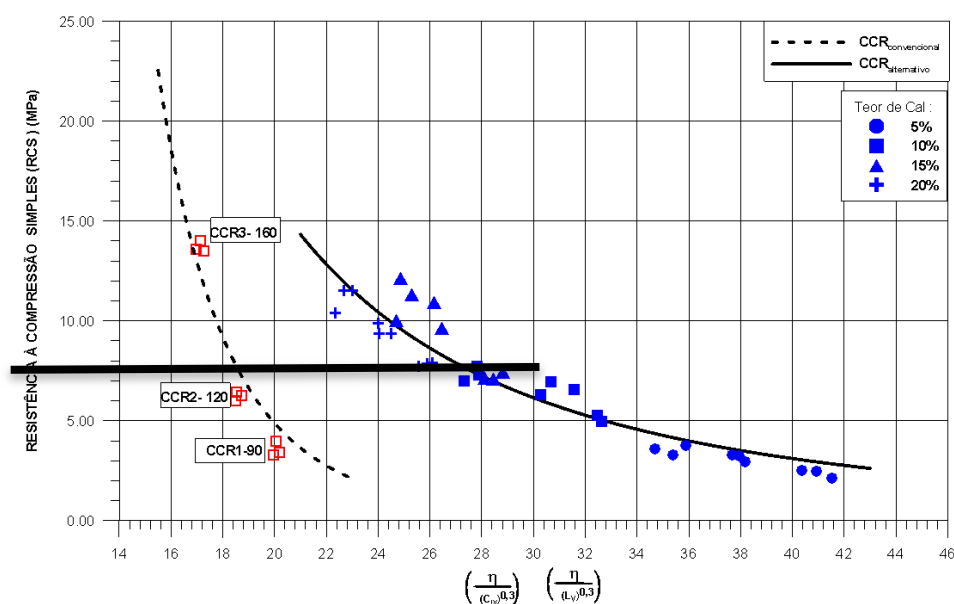


Figura 92 - Resultados da resistência à compressão em função da relação da porosidade e C<sub>iv</sub> e L<sub>v</sub>

Fonte: Autor (2017)

Se analisarmos os resultados da resistência à compressão sem verificarmos o comportamento desta em função da relação da porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico da cal (L<sub>v</sub>), podemos observar a influência do teor da cal na mistura com a cinza volante, pois é com esta mistura e a água que ocorrem as reações pozolânicas e também a influência dos corpos de prova

moldados nos parâmetros de compactação das três energias. As misturas do CCR4-50%, moldados nas energias intermediária e modifica nos teores de cal de 15 e 20%, obtiveram seus resultados de resistências à compressão muito próximos ao  $CCR_{convencional}$  que usou como teor de cimento,  $160\text{kg/m}^3$ , isso para o tempo de cura de 30 dias. A mesma explicação podemos apresentar para esta mistura daquela que foi citada para o  $CCR_{alternativo}$  usando como parâmetro o teor volumétrico da cal e cinza volante ( $B_v$ ). Ao longo do tempo de cura os ganhos de resistência à compressão do  $CCR4-50\%_{alternativo}$ , poderá ultrapassar a resistência à compressão do CCR3-160.

Nas equações 38 e 39, são apresentados as previsões de resistência à compressão do  $CCR_{convencional}$  e  $CCR_{alternativo}$ , respectivamente, referente as curvas da Figura 92. Observa-se que o expoente interno para as duas equações é 0,3. Enquanto que os expoentes externos são distintos, as justificativas são semelhantes aquelas apresentadas no  $CCR_{alternativo}$  que apresentou o comportamento da resistência à compressão em função da relação da porosidade e os teores da cal e cinza volante ( $B_v$ )

$$RCS = 31.250 \cdot 10^4 \left( \frac{\eta}{(C_{IV})^{0,3}} \right)^{-6,0} \quad (38)$$

$$RCS = 1,94 \cdot 10^4 \left( \frac{\eta}{(L_V)^{0,3}} \right)^{-2,37} \quad (39)$$

#### 4.6 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE( $\eta$ ) E TEOR VOLUMÉTRICO DA CAL ( $L_V$ ) NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DA MISTURA CCR4-50% ALTERNATIVO.

Na presente pesquisa foram confeccionados corpos de prova prismáticos, com dimensões de  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ , De acordo com adendo normativo baseado no estudo desenvolvido por Cervo (2004), há possibilidade de utilização destas dimensões reduzidas sem necessidade de fatores de correção, pois segundo a NBR 5738:2015, a dimensão é de  $150 \times 150 \times 450\text{mm}$ . Podemos ressaltar inúmeras vantagens da redução das dimensões: menor consumo de materiais, facilidade no manuseio, produtividade.

A prensa para realizar o ensaio de tração na flexão transmite a velocidade de carregamento em carga/min (N/min), mas a norma brasileira, indica em tensão por minuto, numa faixa de 0,90 a

1,1MPa/min. Para isso, foi utilizado a formulação da norma ASTM C78/C78M:2015, onde permite a troca de unidade da taxa de velocidade, conforme mostra equação 40, Neste trabalho a taxa de velocidade foi de 1,0 MPa/min.:

$$r = \frac{s \cdot b \cdot d^2}{L} \quad (40)$$

onde:

r = taxa velocidade de carregamento, carga controlada, (N/min);

s = taxa de velocidade de carregamento, tensão controlada, (MPa/min);

b = largura média do corpo de prova (mm);

d = espessura média do corpo de prova (mm);

L = comprimento médio do corpo de prova (mm)

Os corpos de prova foram misturados manualmente e depois colocados na forma prismática e compactados estaticamente, em três camadas, de forma que a massa úmida determinada dê o peso específico aparente seco máximo nas energias, normal, intermediária e modificada.

Na Figura 93 está uma sequência da moldagem de compactação estática dos corpos de prova prismático. A prensa tem capacidade para 100 toneladas.



Figura 93 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos  
Fonte: Autor (2017)

Posteriormente, os corpos de prova repousavam em local plano protegido com filme plástico durante 48 horas. Passado este tempo, eram desmoldados e levados a câmara úmida com temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar acima de 95%, sendo apenas retirados no momento dos ensaios (resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade estático e dinâmico). Na Figura 94 estão mostrados os corpos de prova prismáticos após a compactação.



Figura 94 – Foto A (repouso por 48 horas) e foto B (desmoldagem e suporte de madeira) .

Fonte: Autor (2017)

Os ensaios para determinar a resistência à tração na flexão foram realizados conforme a NBR 12142:2010, com aplicação em dois cutelos. Equação 41, utilizada para determinação da resistência à tração na flexão, para dois cutelos.

$$f_{ct,f} = \frac{F.l}{b.h^2} \quad (41)$$

onde:

$F_{ct,f}$  = resistência à tração na flexão. (MPa);

F = carga máxima aplicada, (N);

l = distância entre os cutelos de suporte, (mm);

b = largura média do corpo de prova, na seção de ruptura, (mm);

h = altura média do corpo de prova, na seção de ruptura, (mm);

Os corpos de prova foram moldados nas energias normal, intermediária e modifica e no peso específico aparente seco máximo, nos seguintes teores de cal hidratada de 5%, 10% e 15%, para um tempo de cura de 30 dias na câmara com umidade relativa de no mínimo 95%.

Na Figura 95 está plotada a curva de tendência dos resultados de resistência à tração na flexão em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal. A equação 42 que segue,

representa a previsão dos resultados de resistência à tração na flexão em função da porosidade e o teor volumétrico da cal.

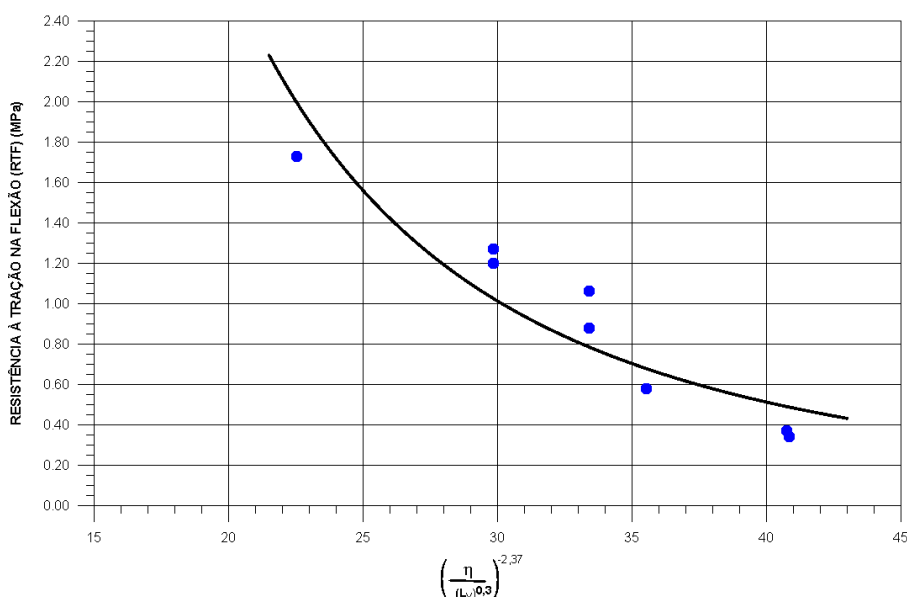


Figura 95 – Correlação da resistência à tração na flexão em função da relação da porosidade e teor volumétrico da cal.

Fonte: Autor (2017)

$$RTF = 0,32 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{\eta}{(L_v)^{0,3}}\right)^{-2,37} \quad (42)$$

onde:

RTF = resistência à tração na flexão (MPa);

$\eta$  = porosidade (%);

$L_v$  = Teor volumétrico da cal (%)

Este comportamento da Figura 95 mostra a importância do aumento do teor de cal de 5 a 15%, indicando que o efeito químico (reações pozolânicas) é significativo no ganho da resistência à tração na flexão. A equação 42, mostra que há uma relação com a resistência à compressão simples, pois os expoentes interno e externo 0,3 e -2,37, respectivamente, são os mesmos da equação 30 da resistência à compressão simples.

A equação 43, mostra uma independência da porosidade e do teor volumétrico da cal, indicando que a resistência à tração por flexão, em média, vale 16% da resistência à compressão. Os valores escalar,  $0,32 \times 10^4$  e  $1,94 \times 10^4$ , tudo indica, são significativamente influenciados pelo tipo de ensaio, pois os tempos e temperatura de cura foram iguais, para ambos os ensaios.



$$\varphi = \frac{RTF}{RCS} = \frac{0,32 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{\eta}{(L_v)^{0,3}}\right)^{-2,37}}{1,94 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{\eta}{(L_v)^{0,3}}\right)^{-2,37}} = 0,16 \quad (43)$$

#### 4.7 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE ( $\eta$ ) E TEOR VOLUMÉTRICO DA CAL ( $L_v$ ) NO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DA MISTURA CCR4-50% ALTERNATIVO.

No concreto que é aplicado em pavimentação, a resistência à compressão não é o parâmetro básico no dimensionamento do material, a estrutura de um pavimento funciona como múltiplas camadas de espessuras finitas, construídas sobre a superfície final de terraplenagem e destinado técnica e economicamente a resistir aos esforços do tráfego de veículos e do clima. No caso de camadas rígidas, que é o caso da estrutura de concreto, a resistência à tração na flexão é aquela que mais se aproxima ao comportamento mecânico, podendo realizar a análise do módulo de elasticidade através do ensaio de flexão medindo a deflexão vertical que ocorre no ponto central da amostra, ou seja, a flecha, que é gerada devido a aplicação de uma carga e sendo medida com auxílio de um transdutor elétrico de deslocamento acoplado a um dispositivo Yoke, posicionado na altura média da amostra prismática.

Para obtenção do módulo de elasticidade se faz necessário à adoção de um método que possibilite a aquisição de dados, que pode não apenas gerar resultados para este, mas também, obter medidas de resistência à tração na flexão. Na Figura 96 são mostrados o corpo de prova prismático e os equipamentos de aplicação de carga, dois cutelos para aplicação da carga no corpo de prova, suporte yoke e transdutor de deslocamento.

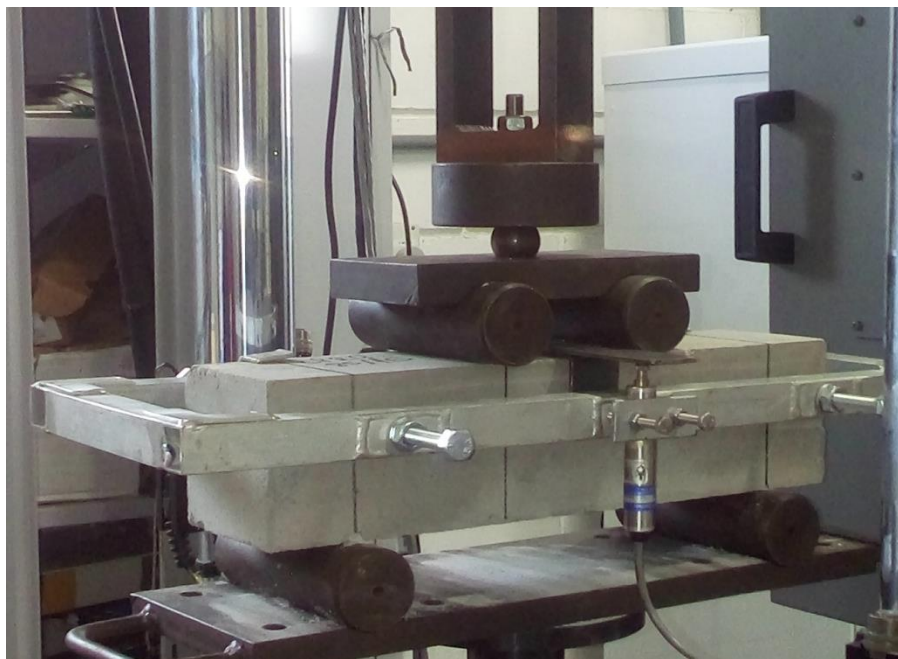


Figura 96 – Ensaio de resistência à tração por flexão em corpo de prova prismático  
Fonte: Autor (2017)

A determinação do módulo de elasticidade estática foi determinada utilizando-se a determinação da flecha, com uso do LVDT (Linear Variable Differential Transformer) e através do ensaio de tração na flexão, nesta pesquisa ficou estabelecido que a determinação do deslocamento vertical (flecha) é aquele, no qual, corresponde a 70% da carga de ruptura do ensaio à tração na flexão.

Assim, o cálculo para determinação do módulo de elasticidade, segundo analogia de Mörh resulta na equação 43, para o caso de um corpo de prova prismático em ensaio de tração na flexão com dois cutelos:

$$E = \frac{23.P.L^3}{108.b.h^3.f} \quad (43)$$

onde :

E = módulo de elasticidade do concreto no ensaio de tração na flexão(MPa);

P = 70% da carga máxima de ruptura (N);

L = dimensão do vão (mm);

b = altura do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova;

f = flecha do meio do vão, para 70% da carga de ruptura (mm).

Na Figura 97 são mostrados a curva de tendência dos resultados do módulo de elasticidade estático, em função da relação entre a porosidade e o teor volumétrico da cal. Este resultados mostram a influência do efeito químico (reação pozolânica) na qual 15% de teor de cal foi a que apresentou os maiores valores de resistência à compressão. A equação 44 indica a previsão do módulo de elasticidade em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal, para um tempo e temperatura de cura de 30 dias e  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, para amostra CCR4-50%<sub>alternativa</sub>.

$$E = 2,33 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{\eta}{(L_v)^{0,3}} \right)^{-2,37} \quad (44)$$

onde :

E = módulo de elasticidade estático (GPa);

$\eta$  = porosidade (%);

$L_v$  = teor volumétrico da cal (%)

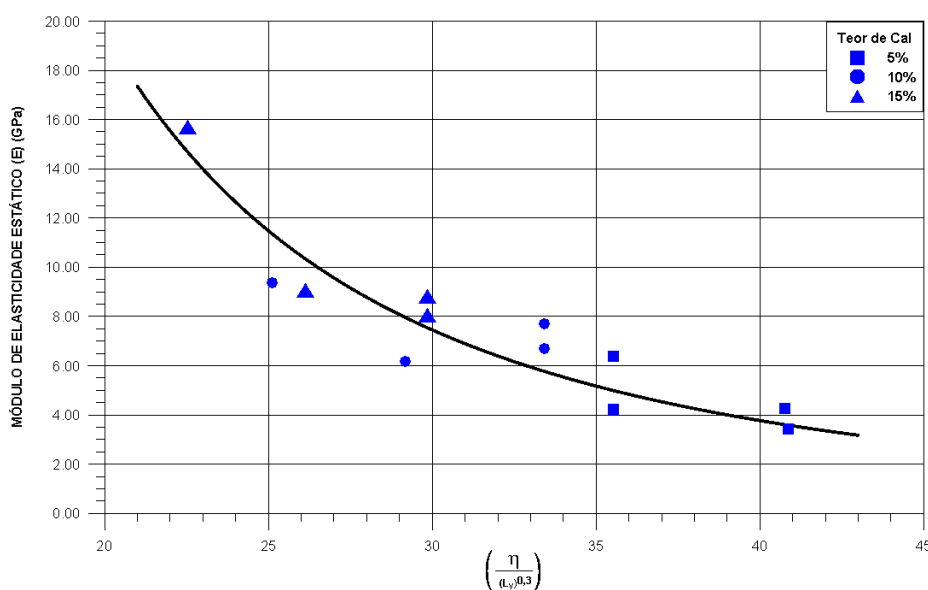


Figura 97 – Correlações do módulo de elasticidade estático com a relação porosidade e teor volumétrico da cal

Fonte: Autor (2017)

Quanto aos expoentes interno e externo, repete-se os valores de 0,3 e -2,37, respectivamente, reforçando a ideia que o valor do escalar,  $2,33 \times 10^4$ , depende muito do tipo de ensaio e provavelmente no tempo de temperatura de cura, considerando a mesma mistura.

As equações dos resultados dos ensaios de compressão simples e diametral em função da porosidade e teor volumétrico da cal por apresentarem os mesmos expoentes interno e externos da equação 44, 0,3 e -2,37, respectivamente, podem apresentar uma relação com o módulo de elasticidade estático independente da porosidade e do teor volumétrico da cal, equações 45 e 46.

$$\varepsilon = \frac{E}{RCS} = \frac{2,33 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{\eta}{(L_V)^{0,3}}\right)^{-2,37}}{1,94 \cdot 10^1 \cdot \left(\frac{\eta}{(L_V)^{0,3}}\right)^{-2,37}} = 1,20 \times 10^3 \quad (45)$$

$$\alpha = \frac{E}{RCD} = \frac{2,33 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{\eta}{(L_V)^{0,3}}\right)^{-2,37}}{0,19 \cdot 10^1 \cdot \left(\frac{\eta}{(L_V)^{0,3}}\right)^{-2,37}} = 1,23 \times 10^4 \quad (46)$$

onde:

E = módulo de elasticidade (GPa);

RCS = resistência à compressão simples (GPa);

RCD = resistência à compressão diametral (GPa)

#### 4.8 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE ( $\eta$ ) E TEOR VOLUMÉTRICO DA CAL ( $L_V$ ) NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DA MISTURA CCR4-50% ALTERNATIVO.

Para este ensaio foram moldados corpos de prova que serviram para realizar o ensaio de resistência a tração na flexão. Segue-se a sequência que está na Figura 98 em corpos de prova prismático de 100 x 100 x 400mm. Realizava-se o ensaio para determinação do módulo de elasticidade antes do ensaio de resistência à tração na flexão, por transmissão direta, onde os transdutores se posicionam em lados opostos. Para o ensaio de módulo dinâmico foi adotado o método da norma britânica BS – 1881 part 203:1986.

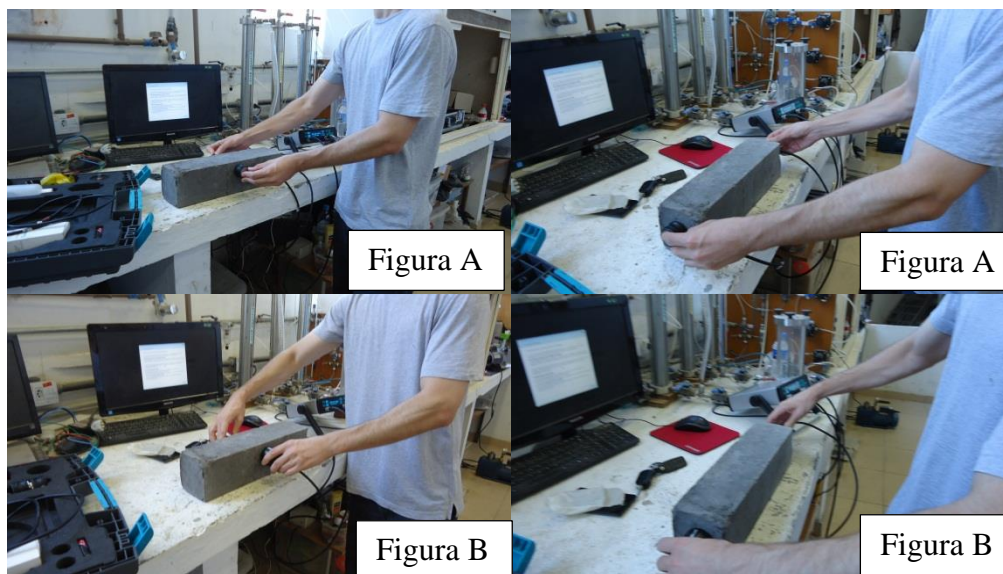


Figura 98 – Fotos da sequência para determinação da onda P (Fig. A) e onda S (Fig.B)

Fonte: Autor (2017)

A Figura 98 mostra a medição para a determinação para as ondas P e S. Foram aplicados os impulsos nas extremidades e em sentidos opostos no meio do vão e se verificou que resultados das velocidades foram iguais.

Segunda a norma britânica BS – 1881 part 203:1986, o comprimento do percurso sobre o qual a velocidade do pulso é medida deve ser suficiente longo para não ser significativamente influenciado pela natureza heterogênea do concreto, então se recomenda que o comprimento mínimo do percurso deva ser de 100mm para o concreto em que o tamanho máximo nominal do agregado é de 20mm e 150mm para o concreto em que o tamanho máximo do agregado é entre 20mm e 40mm.

O ensaio de propagação de onda ultrassônica pode ser considerado um dos ensaios não destrutivos, obtendo certo destaque dentre os outros métodos para estimativa de vários parâmetros de concreto, tais como: módulo de elasticidade dinâmico, módulo de elasticidade estático, sendo também útil na estimativa do grau de compactação de camadas e falhas nas peças de concreto. A determinação do módulo dinâmico baseia-se no conceito que a velocidade de propagação de ondas longitudinais em um meio homogêneo e isotrópico depende das constantes elásticas do material, segundo a equação 47:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\gamma}} \quad (47)$$

onde:

V = velocidade de propagação de onda (m/s);

E = módulo de elasticidade (MPa);

$\gamma$  = Peso específico (MN/m<sup>3</sup>)

Medindo um tempo de transmissão de onda S com o equipamento Pundit Lab, podemos determinar o módulo de cisalhamento (G), da seguinte equação 48:

$$G = \gamma \cdot V_s^2 \quad (48)$$

onde:

G = módulo cisalhante (MPa);

$\rho$  = massa específica aparente seca (kg/m<sup>3</sup>);

$V_s$  = velocidade de pulso da onda S (m/s)

Outra informação necessária para calcular o módulo de elasticidade dinâmico é o coeficiente de Poisson. Em função da impossibilidade de se obter este valor experimentalmente, esta informação foi estabelecida com base na literatura, Chavhan, 2015, para concretos de baixas resistências o coeficiente de Poisson adotado é de 0,3. De posse destas informações segue-se a equação 49 do módulo de elasticidade dinâmico

$$E_d = 2G \cdot (1 + \nu) \quad (49)$$

onde:

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

G = módulo cisalhante (MPa);

$\nu$  = coeficiente de Poisson

Na Figura 99 é mostrada a curva de tendência dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico em função da relação entre a porosidade e o teor volumétrico da cal. Esta curva mostra a influência dos efeitos químico (reação pozolânica) no aumento do módulo de elasticidade dinâmico.

A equação 50 mostra a previsão do módulo de elasticidade dinâmico em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal, para um tempo e temperatura de cura de 30 dias e  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, para amostra CCR4-50%<sub>alternativa</sub>. Esta equação repete os expoentes interno e externo, 0,3 e -2,37, dos ensaios de compressão simples diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático, confirmando que para o mesmo tipo de mistura e o mesmo tempo e temperatura de cura, o que muda é o escalar que possivelmente sofre com a influência do tipo de ensaio

$$E_d = 4,23 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{\eta}{(L_V)^{0,3}} \right)^{-2,37} \quad (50)$$

onde:

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

$\eta$  = porosidade (%);

$L_V$  = teor volumétrico da cal (%).

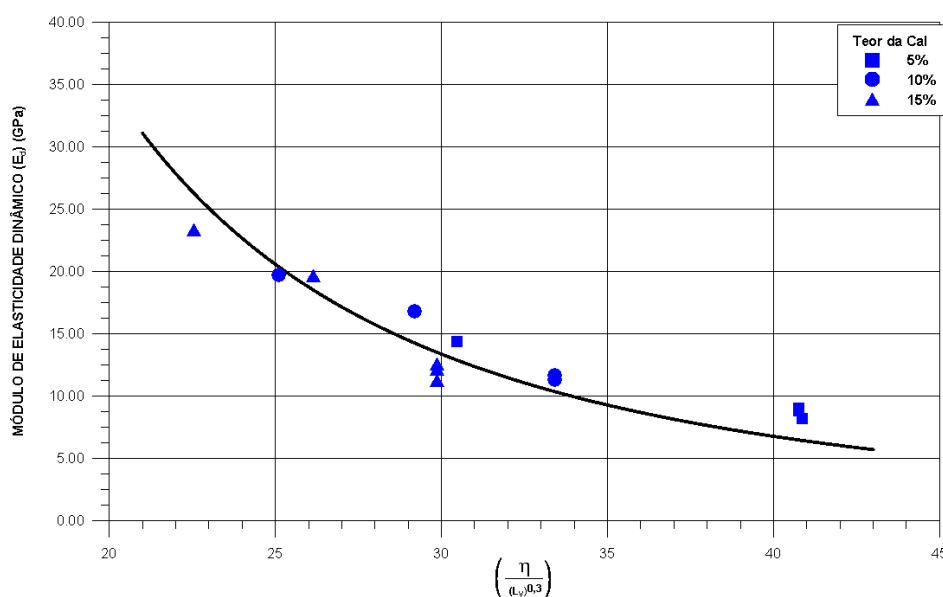


Figura 99 - Correlações do módulo de elasticidade dinâmico com a relação porosidade e teor volumétrico da cal  
Fonte: Autor (2017)

Os modelos matemáticos de previsão dos módulos de elasticidade estático e dinâmico apresentados em função da relação da porosidade e teor volumétrico da cal nos levam a possibilidade de apresentar uma relação entre eles, equação 51.

$$a = \frac{E}{E_d} = \frac{2,33 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{\eta}{(L_V)^{0,3}}\right)^{-2,37}}{4,23 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{\eta}{(L_V)^{0,3}}\right)^{-2,37}} = 0,55 \quad (51)$$

A equação 51 mostra uma independência da porosidade e do teor volumétrico da cal, indicando que o módulo de elasticidade estático, em média, vale 55% do módulo de elasticidade dinâmico. Os valores escalar,  $2,33 \times 10^4$  e  $4,23 \times 10^4$ , tudo indica, são significativamente influenciados pelo tipo de ensaio, pois os tempos e temperatura de cura foram iguais, para ambos os ensaios.

#### 4.9 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE ( $\eta$ ) E TEOR VOLUMÉTRICO DA CAL E CINZA VOLANTE ( $B_v$ ) NA RESISTÊNCIA DA COMPRESSÃO SIMPLES

No item 4.5 foi definido o parâmetro  $B_v$ , para comparar o comportamento de sua relação sobre os resultados da compressão simples do  $CCR_{\text{alternativo}}$  com a relação apresentada pelo  $CCR_{\text{convencional}}$ , mas neste item a finalidade é apresentar com mais detalhes este parâmetro. No capítulo 3 foi determinado a proporção de cinza volante que obteve o maior resultado da resistência à compressão simples para isso foram apresentadas cinco misturas variando a cinza volante e fixando a cal em 10%, como está indicado Os resultados foram aqueles que seguem, abaixo na reprodução da tabela 61.

Tabela 61 – Resultados do ensaio de compressão simples para o  $CCR_{\text{alternativo}}$

Mistura	Percentual de cinza volante (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (Média) <sup>1</sup> (MPa)
CCR1	20	1,93
CCR2	30	2,75
CCR3	40	4,60
CCR4	50	6,83
CCR5	60	4,80

Fonte: Autor (2017)

1 = três corpos de prova



Abaixo é apresentada a equação 52 para definição do parâmetro  $B_v$

$$B_v = \left( \frac{(V_{cal} + V_{cz})}{V_T} \right) \cdot 100 \quad (52)$$

onde:

$B_v$  = teor volumétrico da cal e cinza volante;

$V_{cal}$  = volume da cal ( $m^3$ );

$V_{cz}$  = volume da cinza volante ( $m^3$ );

$V_T$  = volume total da amostra ( $m^3$ ).

Na Figura 100 estão mostrados os resultados da resistência à compressão simples, em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal e cinza volante ( $B_v$ ), para proporções de cinza volante de 20%, 30%, 40%, 50% e 60%, com teor da cal fixo em 10%.

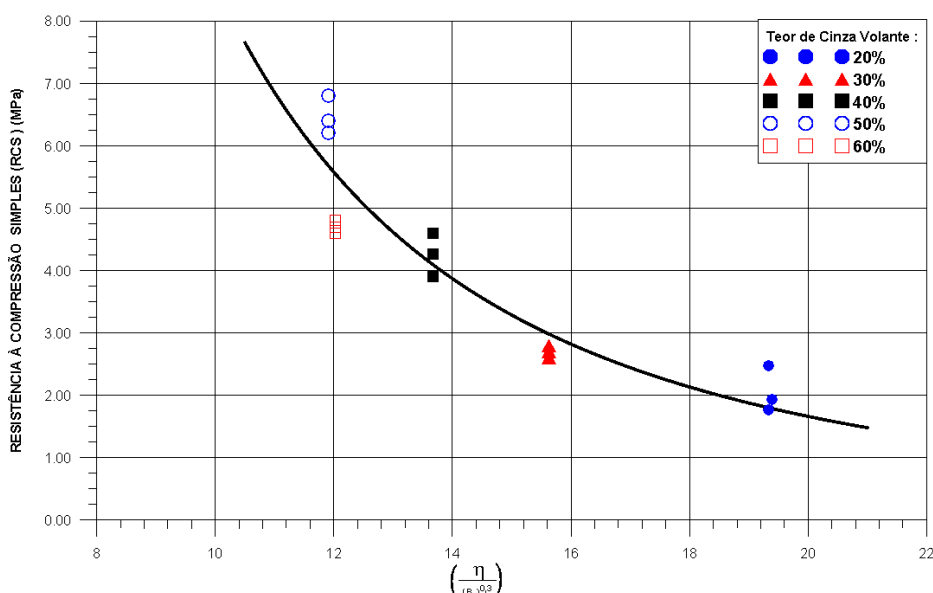


Figura 100 - Resistência à compressão simples em função da relação porosidade e teor volumétrico da cal e cinza volante ( $B_v$ )

Fonte: Autor (2017)

As equações 53 e 54 mostram a previsão da resistência à compressão em função da relação da porosidade e o teor volumétrico da cal e cinza volante e teor da cal, respectivamente, para o tempo e temperatura de cura de 30 dias e  $23 \pm 2^\circ C$ .

$$RCS = 0,20 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{\eta}{(B_v)^{0,3}} \right)^{-2,37} \quad (53)$$

$$RCS = 1,94 \cdot 10^4 \left( \frac{\eta}{(L_v)^{0,3}} \right)^{-2,37} \quad (54)$$

onde:

RCS = resistência à compressão simples (MPa);

$\eta$  = porosidade (%);

$B_v$  = teor volumétrico da cal e cinza volante (%);

$L_v$  = teor volumétrico da cal (%)

A equação 53, repete os expoentes internos e externos, 0,3 e -2,37, de comportamento de todos os ensaios apresentados anteriormente. Pode-se observar a distinção entre os escalares de ambas equações 53 e 54. O motivo não foi o tipo de ensaio, mas a mudança de parâmetro onde está incluído o volume de cinza volante no  $B_v$ .

Na figura 101 são mostradas, para comparação, as curvas da relação da porosidade e teor volumétrico da cal ( $L_v$ ) e teor volumétrico da cal e cinza volante sobre os resultados da resistência à compressão.

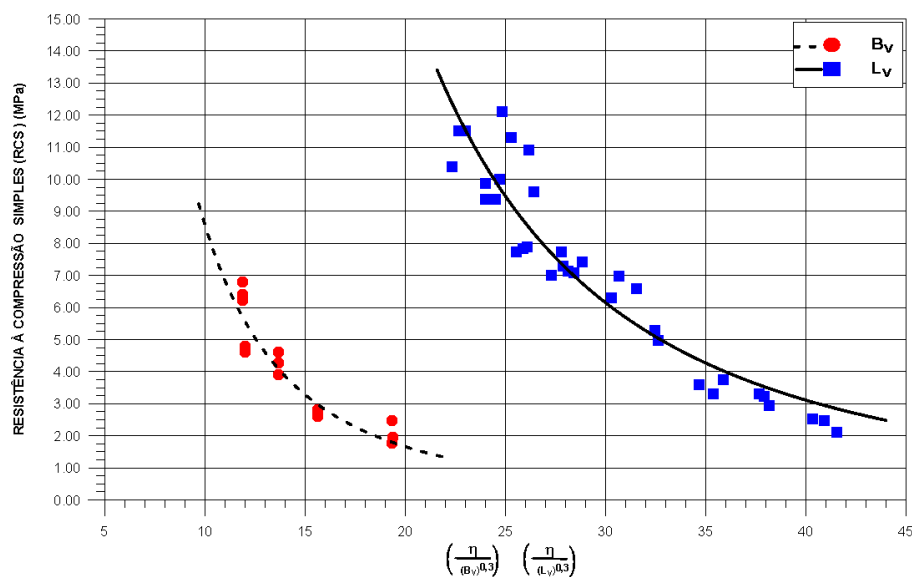


Figura 101 - Resistência à compressão simples em função da relação porosidade e  $L_v$  e  $B_v$

Fonte: Autor (2017)

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta pesquisa as finalidades principais são verificar a influência da cinza volante e cal hidratada em substituição ao cimento Portland, no Concreto Compactado com Rolo-CCR através dos resultados das propriedades mecânicas para serem aplicados nas camadas de base e sub-base de pavimento de estradas vicinais e vias urbanas, bem como determinar um método racional de dosagem para previsão das resistências à compressão, diametral, à tração na flexão e módulos de elasticidade estático e dinâmico em função da relação da porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico da cal hidratada ( $L_v$ ).

Os resultados apresentados na análise e discussão e subsidiados pela revisão bibliográfica chegam as seguintes conclusões :

### 5.1 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO VARIANDO A QUANTIDADE DE CINZA VOLANTE

- a) Os pesos específicos aparentes secos máximos das misturas com quantidades 20%, 30%, 40%, 50% e 60% de cinza volante, fixado a cal hidratada em 10% e moldados na energia intermediária, diminuíram devido ao aumento de finos (partículas menor do que 0,075mm) presentes na cinza volante em relação a quantidades de agregados miúdo (areia) e grãos (brita 0 e 1);
- b) A mistura que apresentou a maior resistência à compressão foi aquela com a quantidade de cinza volante de 50%. Todas as misturas foram ensaiadas ao 30 dias de cura na mesma temperatura e aquela que apresentou o maior peso específico aparente seco máximo (menor porosidade) foi com 20% de cinza volante, isso é um indicativo que o efeito químico (reações pozolânica) foi significativo no ganho de resistência à compressão e depende da relação

quantitativa entre a cinza volante e a cal hidratada, que neste caso foi com a quantidade de 50%;

- c) Na mistura que foi utilizado 60% de cinza volante há uma queda de resistência em relação a mistura com quantidade de cinza de 50%. Possivelmente, houve um excesso de cinza volante em relação ao teor de cal (efeito químico) e uma diminuição significativa dos agregados miúdo e graúdos(efeito físico).

## 5.2 RESULTADOS DAS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E DIAMETRAL PARA A MISTURA DE 50% DE CINZA VOLANTE, CCR4-50% ALTERNATIVO

- a) Nesta mistura foram moldados corpos de prova com teores de cal de 5%, 10%, 15% e 20%, nas energias normal, intermediária e modificada, e nos pontos de seus pesos específicos aparentes secos máximos, todos curados aos 30 dias de cura e na temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ . O que podemos observar, quanto a porosidade, é que os resultados de resistência a compressão são influenciados por este, isto é, a maior energia de compactação leva a uma menor porosidade, dentro da curva dos máximos, mas o ganho não está somente no efeito físico, que é a aproximação dos grãos, mas, também, no efeito químico (reações pozolânicas) devido ao aumento da região de ocorrência da reações pozolânicas e os resultados indicam que este efeito é o mais significativo na diminuição da porosidade;
- b) Quanto a influência do teor de cal hidratada sobre os resultados de resistência à compressão simples e diametral, foi observado que a maior taxa de ganho de resistência foram nos corpos de prova que adicionaram 15 a 20% de cal hidratada. Na sua tese de doutorado, Hoppe Filho (2008), cita: **“a avaliação da taxa de reação pozolânica está vinculada à taxa de consumo do hidróxido de cálcio e a taxa de formação dos hidratos, em função da relação hidróxido de cálcio/cinza volante e de uma maneira geral, quanto maior a disponibilidade de hidróxido de cálcio, maior será a quantidade de hidratos e, conseqüentemente, maior consumo de**

**hidróxido de cálcio**”, fica evidente que esta maior taxa de ganho de resistência é devido as reações pozolânicos entre a cal e a cinza volante e que estes são os teores de cal são os melhores para esta quantidade de cinza volante e possivelmente geraram as maiores quantidade de minerais cimentantes do tipo silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CAH);

- c) Podemos concluir, também, que os maiores ganhos da resistência à compressão simples e diametral é influenciado pelo efeito químico e o fator principal foi o teor de cal e não a variação da porosidade (variação do peso específico aparente seco);
- d) Quanto ao comportamento dos resultados das resistências à compressão simples e diametral em função da relação da porosidade e o teor volumétrico da cal, podemos concluir:
- nesta pesquisa as equações de previsão das resistências à compressão e diametral, em função com a relação da porosidade e teor volumétrico da cal, mostraram em comparações com outras pesquisas desenvolvidas que o expoente interno e externo são influenciados pelo tipo de mistura que é constituído o material, enquanto que o valor do escalar é influenciado pelo tipo de mistura, ensaio, tempo e temperatura de cura;
  - as equações de previsão apresentadas para a mistura CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, sobre os resultados de resistência à compressão simples e diametral, mostram que para ambos os expoentes interno e externo foram 0,3 e -2,37, fortalecendo a ideia que os expoentes são influenciados pelo tipo de mistura, enquanto que seus escalares foram distintos, mostrando a influência do tipo de ensaio;.
  - a relação entre as equações de previsão das resistências à compressão simples e diametral, mostraram sua independência da porosidade e do teor volumétrico da cal, dependendo apenas do valor dos escalares, que neste estudo mostrou que o valor da resistência à compressão

diametral é aproximadamente 10% do valor da resistência à compressão simples.

### 5.3 RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SIMPLES DA MISTURA DE 50% DE CINZA VOLANTE, CCR4-50%<sub>ALTERNATIVO</sub>, COM E SEM CINZA DE FUNDO

- a) A inclusão da cinza de fundo em substituição a areia fez com que a mistura, na sua constituição apresentasse mais materiais finos (<0,075mm) do que a areia, onde 23% desta cinza de fundo, em massa, tem a dimensão de fração silte (0,02mm a 0,06mm), conseqüentemente apenas o peso específico aparente seco máximo moldado na energia modificada apresentou resultado maior do que aquele da mistura sem cinza de fundo compactado na energia normal. Os corpos de prova com cinza de fundo foram moldados somente na energia intermediária para o ensaios de resistência à compressão, e nos teores de 5%, 10% e 15% de cal e seu peso específico aparente seco máximo é menor do que todas aquelas misturas sem cinza de fundo compactadas nos pesos específicos aparentes secos máximos das três energias de compactação, isto é, a porosidade da mistura com cinza de fundo é a maior;
- b) Frente a esta constatação acima, podemos observar que os resultados da resistência à compressão simples da mistura com cinza de fundo obteve resultados muito próximos daqueles moldados nas energias intermediária e modificada, em todos os teores de cal, possivelmente, mesmo moldado numa porosidade menor, há uma forte indicação que a cinza de fundo, também, reagiu com a cal (reações pozolânicas), significando que a influência do efeito químico (reação pozolânica) é maior do que o efeito físico (porosidade);
- c) Referente a equação de previsão de resistência à compressão, os resultados da mistura com cinza de fundo foram incluídos junto com a mistura sem cinza de fundo, mostrando a influência do teor da cal no ganho de

resistência em relação a porosidade, isto é, comportamento semelhante a mistura sem cinza de fundo. Possivelmente, seja porque, granulométricamente a cinza de fundo se aproximou da areia utilizada neste trabalho.

#### 5.4 RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SIMPLES DO $CCR_{CONVENCIONAL}$ COMPARADO COM O $CCR_{ALTERNATIVO}$

- a) O Concreto Compactado com Rolo denominado convencional usou os seguintes consumos de cimento, 90, 120 e 160kg/m<sup>3</sup> o que equivale em termos de teor de cimento em 6, 8 e 10%, em massa, respectivamente. A equação de previsão da resistência à compressão do  $CCR_{convencional}$  mostrou que o expoente interno tem o mesmo valor daquele do  $CCR_{alternativo}$ , mas o expoente externo é -6,0, possivelmente, o tipo de aglomerante foi o que mudou este valor, pois este é influenciado pela taxa de hidratação (velocidade de reação química) e tipo de minerais cimentantes, onde no cimento Portland esta taxa de hidratação é bem mais rápida do que as reações pozolânicas que ocorrem entre as cinza volante, cal hidratada e a água;
- b) Conclusão dos resultados de comparação do comportamento da equação de previsão de resistência à compressão do  $CCR_{convencional}$  com as duas equações de previsão de resistência à compressão simples do  $CCR_{4alternativo}$ :
- a primeira equação refere-se  $CCR_{4-50\%}$  que verificou a influência da relação da porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico da cal ( $L_v$ ) sobre a resistência à compressão e a segunda refere-se ao  $CCR_{alternativo}$  variando a quantidade de cinza volante de 20%, 30%, 40%, 50% e 60% e fixando a cal em 10% que verificou a influência da relação da porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrica da cal e da cinza volante ( $B_v$ ) sobre a resistência à compressão;
  - os resultados de comparação da resistência à compressão do  $CCR_{convencional}$  e o  $CCR_{alternativo}$ , confirmam a significância do ganho de

resistência do efeito químico (reações pozolânicas) do CCR<sub>alternativo</sub>, onde mostra que o efeito da variação teor de cal é muito significativo para as reações pozolânicas, como também a quantidade de cinza volante;

- podemos comprovar que no CCR<sub>alternativo</sub>, o maior ganho de resistência à compressão foi para mistura utilizando a quantidade de 50% de cinza volante, mostrando que a quantidade de cinza influencia na resistência, até um determinado valor. Quando comparado com o CCR<sub>convencional</sub>, a mistura com 50% de cinza volante praticamente se aproximou aos resultados do CCR<sub>convencional</sub> com 8% de cimento (120kg/m<sup>3</sup>), ambas misturas compactadas na energia intermediária;
- na mistura CCR4-50%, na qual variou o teor de cal(5%, 10% e 15%) e a energia de compactação (variação da porosidade), podemos observar que a influência do teor de cal é muito significativa para o ganho de resistência à compressão até um determina valor , reforçando que a relação teor de cal e quantidade de cinza volante é muito importante nas reações pozolânicas. Quando comparada com o CCR<sub>convencional</sub>, o maior ganho de resistência à compressão foi para teor de cal de 15% para ambas energias intermediária e modificada da mistura CCR4-50%. Os resultados de resistência à compressão desta mistura, se aproximou ao resultados de resistência do CCR<sub>convencional</sub> que usou 10% de cimento (160kg/m<sup>3</sup>), para o tempo de cura de 30 dias, pois este fator é bem significativo no ganho de resistência quando ocorrem reações pozolânicas.

## 5.5 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA A MISTURA CCR4-50%<sub>ALTERNATIVA</sub>

- a) O comportamento da resistência à tração na flexão em função da relação da porosidade ( $\eta$ ) e teor volumétrico da cal ( $L_v$ ), repete os valores dos expoentes interno e externo da equação dos ensaios de compressão simples e diametral, 0,3 e -2,37, respectivamente. Reforçando que estes valores



dependem significativamente do tipo de mistura, enquanto que o escalar é influenciado pelo tipo de mistura e ensaio para o tempo e temperatura de cura constante, pois estes fatores influenciam, também, o valor do escalar;

- b) Os resultados da resistência à tração na flexão mostram que são influenciados pelos resultados da resistência à compressão simples, isto é, seus resultados são diretamente proporcionais. Repete-se novamente os fatores que influenciam a resistência à tração, sendo o mais significativo o teor de cal até um determinado valor que dependerá da quantidade de cinza volante na mistura;
- c) A relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão simples destas equações mostra a independência da porosidade e do teor volumétrico da cal, pois tem os mesmos expoentes interno e interno. No final, fica a relação entre os escalares que mostra, nesta pesquisa, que a resistência à tração na flexão vale 16% do valor da resistência à compressão simples, para o tempo e temperatura de cura de 30 dias e  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

## 5.6 RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO PARA A MISTURA CCR4-50%<sub>ALTERNATIVA</sub>

- a) As equações de previsão de módulo de elasticidade estática e dinâmica repetem os valores dos expoentes internos e externos dos outros ensaios, 0,3 e -2,37, respectivamente, Podemos, a princípio, concluir que estes expoentes mudam conforme o tipo de mistura, exceção é quando na mistura mudamos apenas os materiais com propriedades cimentantes, na qual a taxa de hidratação são distintas, quanto ao tempo de reação e neste caso mostrou que somente o expoente externo é influenciado;
- b) Os resultados dos módulos de elasticidade e dinâmico mostram, também, que são influenciados pelo resultados da resistência à compressão simples, isto é, seus resultados são diretamente proporcionais. Na mistura CCR4-50%, mostra novamente a importância da relação quantidade de cal e de

cinza volante, onde o teor de cal é bem significativo para o aumento dos módulos de elasticidade e dinâmico, isso influenciará na rigidez da mistura;

- c) A relação entre os módulos de elasticidade estática e dinâmica destas equações mostram uma independência da porosidade e teor de cal volumétrico, por apresentarem os mesmos expoentes interno e externo. Este permite concluir, para a mistura CCR4-50%, que o módulo de elasticidade estático vale 55% da valor do módulo de elasticidade dinâmico, para o tempo e temperatura de cura de 30 dias e  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

## 5.7 SUGESTÕES

- a) Realizar ensaio de difratometria nos tempos de cura de 30, 90 e 180 dias, para mistura CCR4-50%, com a finalidade de determinar as reações pozolânicas e se estabilizaram aos 180 dias, através da comparação do percentual da estrutura amorfa ao longo do tempo e aquela estrutura amorfa da cinza *in natura*. Segue-se o mesmo programa do ensaio de difratometria mas realizando ensaios de termogravimetria;
- b) Realizar os mesmos ensaios, na mistura CCR4-50%, para os tempo de cura de 90 e 180 dias para verificar a influência deste fator, principalmente no módulo de elasticidade estático;
- c) Adicionar cimento Portland (CP-V), nos teores de 5% e 10%, na mistura CCR4-50% para verificar sua influência, nos primeiros dias de cura, quanto ao ganho de resistência, para os tempos de cura de 7dias, 14 dias e 30 dias, nos ensaios de compressão simples e módulos de elasticidade estático e dinâmico;
- d) O mesmo programa de ensaios do cimento Portland, realizar com adição de ativadores químicos (cloreto de sódio, hidróxido de sódio, sulfato de cálcio, etc.) para verificar sua influência na reatividade pozolânica da mistura cinza-cal da mistura CCR4-50%;
- e) Verificar a influência da cinza de fundo em substituição ao agregado miúdo (areia), num estudo mais amplo, realizando a variação dos mesmos fatores

usados na mistura CCR4-50% mas para os tempos de 30, 90 e 180 dias, para todos os ensaios realizados nesta pesquisa;

- f) Montar um programa de planejamento experimental para realizar análise de variância, com a finalidade de verificar os fatores mais significativos nos resultados dos ensaios realizados no CCR4-50%, para os tempos de 30, 90 e 180 dias;
- g) Verificar a influência da relação da porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico da cal e cinza volante ( $B_v$ ) sobre as propriedades mecânicas estudadas nesta pesquisa, para os teores de cinza de 20, 30, 40, 50 e 60% e para cada um destes variar o teor de cal em 5, 10 e 15%, moldados na energia intermediária para os tempos de cura de 30, 90 e 180 dias;
- h) Executar em campo o CCR4-50%<sub>alternativo</sub>, como base, com revestimento de um Concreto de Asfalto Usinado à quente, para realizar um estudo comparativo de características elásticas obtidas em laboratório e em campo, sobretudo para estabelecer as diferenças na extrapolação de escalas, ao longo do tempo.

## REFERÊNCIAS

ABO-QUDAIS, S.A. Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. **Construction and Building Materials**, v. 19. p. 257-263, 2005.

ABREU, J. V. **Estudo do concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação**. 2002. 116p. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ACI. Committee report 207.5R-99. Roller Compacted Mass Concrete. **American Concrete Institute**, Detroit, 1999.

\_\_\_\_\_. Committee 325. ACI 325-10. **Report on Roller-Compacted Concrete Pavements**. 1995. p. 32.

\_\_\_\_\_. Compaction of Roller-Compacted Concrete. ACI 309.5R-00 (Reapproved 2006). **American Concrete Institute**, Farmington Hills, MI, USA, 2000. 15 pages.

\_\_\_\_\_. State-of-the-Art Report on Roller-Compacted Concrete Pavements. ACI 325.10R-95 (Reapproved 2001). **American Concrete Institute**, Farmington Hills, MI, USA, 1995. 31 pages.

ACRGTO Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. **Manual, association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec**. Canadá, 2001. 119 p.

ALHADAS, Miguel F. S. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto**. Belo Horizonte: UFMG, 2008.

ANDRADE; W. P. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

ANDRIOLO, F. R. **“Contribuições para conhecimento e desenvolvimento do concreto rolado”**. Brasil: Barber Greene, 1989.

ANDRIOLO, F. R.; SGARBOZA, B. C. **“Inspeção e controle de qualidade do concreto”**. São Paulo: Newswork, 1993.

ANTIOHOS, S.; TSIMAS, S. Activation of fly ash cementitious systems in the presence of quicklime: Part I. Compressive strength and pozzolanic reaction rate. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 5, p. 769-779, maio 2004.

ARAÚJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto.** São Paulo: IBRACON, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004. **Resíduos Sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 10.006. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 10005. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 12142. **Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. NBR 12653. **Materiais pozolânicos – Especificação.** Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 5733. **Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR 5738. **Concreto -Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 5739. **Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. NBR 5751. **Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. NBR 5752. **Materiais pozolânicos – Determinação do Índice de Desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, jun. 2014.

\_\_\_\_\_. NBR 6502. **Rochas e solos.** Rio de Janeiro, set. 1995.

\_\_\_\_\_. NBR 6508. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7181. **Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1988.

\_\_\_\_\_. NBR 7181. **Solo- Análise granulométrica – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7182. **Solo-Ensaio de Compactação. Método de ensaio.** Rio de Janeiro, ago. 1986.

\_\_\_\_\_. NBR 7222. **Argamassa e concreto - Determinação de resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, mar. 1994.

\_\_\_\_\_. NBR 7222. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. NBR 7389-1. **Agregado – Análise petrográfica do agregado para concreto. Parte 1: Agregado miúdo.** Rio de Janeiro, 6 ago. 2009.

\_\_\_\_\_. NBR 8802. **Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. NBR 9935. **Agregados-Terminologia.** Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. NBR NM 76. **Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, jan. 1998.

ASTM. C. 597-16. **Standard test method for pulse velocity through concrete.** 2016.

\_\_\_\_\_. C469/C469M – 10. **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.** USA: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

\_\_\_\_\_. D3682. **Standard Test Method for Major and Minor Elements in Combustion Residues from Coal Utilization Processes.** 15 out. 2013.

\_\_\_\_\_. D3942-03. **Standard Test Method for Determination of the Unit Cell Dimension of a Faujasite-Type Zeolite.** Jan. 2013.

\_\_\_\_\_. D4326. **Standard Test Method for Major and Minor Elements in Coal and Coke Ash By X-Ray Fluorescence.** 1997.

BABU, K. G.; YERRAMALA, A. Strength properties of high workable and high volume fly ash roller compacted concrete. **Journal of Engineering Research and Studies**, v. III, p. 11-17, july-sept. 2012.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação - materiais, suas propriedades e técnicas construtivas.** São Paulo: USP, 2002.

BENTZ, D. P.; REMOND, S. **Incorporation of fly ash into a 3-D cement hydration microstructure model.** National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6050, August 1997.

BERRY, E. E. et al. Hydration in high-volume fly ash concrete binders. **ACI Materials Journal**, v. 91, n. 4, p. 382-389, jul./ago. 1994.

BIERNACKI, J. J.; WILLIAMS, P. J.; STUTZMAN, P. E. Kinetics of reaction of calcium hydroxide and fly ash. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 4, p. 340-349, jul.-ago. 2001.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. “Projeções”. In: **Plano Nacional de Energia 2030**, Brasília: EPE, 2007. Capítulo 2.

BREU, J. V. “**Estudo do concreto de alta resistência compactado com rolo**”. 2002. p. 1-32. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

BRITISH STANDARD, B. S. Testing concrete: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete, London. **British Standards Institution**, Part 203, 1986.

BROUWERS, H. J. H.; VAN EIJK, R. J. Chemical reaction of fly ash. In: **11<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)**, Durban, South Africa, p. 791-800, 16 maio 2003.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, fev. 1938.

CAO, Cheng; SUN, Wei; QIN, Honggen. The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 1, p. 71-75, 2000.

CERVO, T. C. **Estudo da resistência à fadiga de concreto de cimento portland para pavimentação**. Tese (doutorado). 2004. 220p. Universidade de São Paulo. Escola politécnica, São Paulo, 2004.

CHAVAN, P. P.; VYAWAHARE, M. R. Correlation of static and Dynamic Modulus of Elasticity for Different SCC Mixes. **International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication**, v. 3, n. 7, jul. 2015.

CHUN, Y-M.; NAIK, T. R.; KRAUS, R. N. Roller-compacted concrete pavements. **Report No. CBU-2008-03 REP-637**, march 2008.

CONSOLI, N.C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K.S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 133(2), 197-205, 2007.

CONSOLI, N.C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA R.B. Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 23 (4), 432-440, 2011.

CONSOLI, N.C.; LOPES JR., L.S., CONSOLI, B.S. AND FESTUGATO, L. "Mohr-Coulomb failure envelopes of lime-treated soils". **Géotechnique**, 64 (2), 165-170, 2014a.

CONSOLI, N.C., ROCHA, C.G.; SALDANHA, R.B. Coal fly ash-carbide lime bricks: An environment friendly building product. **Construction and Building Materials**, 69, 301-309, 2014b.

CONSOLI, N. C., ROCHA, C. G., AND MAGHOUS, S. Strategies for developing more sustainable dosages for soil-coal fly ash-lime blends. **J. Mater. Civ. Eng.**, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001648, 2016a.

CONSOLI N.C.; DE PAULA, T.M.; BORTOLOTTI, M.S.; BARROS, L.M.; PEREIRA, F.; ROCHA, M.M. Coal fly ash-carbide lime admixtures as an alternative to concrete masonry blocks: influence of ash grounds. **Journal of Materials in Civil Engineering** 29(2), 04016224-1-04016224-6, 2016b.

CONSOLI, N.C.; R.B.; MALLMANN, J.E.C; PAULA, T.M.; HOCH, B.Z. Enhancement of strength of coal fly ash–carbide lime blends through chemical and mechanical activation. **Construction and Building Material**, 157, 65-74, 2017.

CPCA. Roller Compacted Concrete (RCC) Pavements—Design and Construction. **Concrete Info**, CP018, v. 1, 1997. 4 pages.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. Tese (doutorado). 2001. 191p. PEMC UFSC, Santa Catarina, 2001.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2009.

DEL CARPIO, J. A. V. **Estudo da influência da adição da cinza de casca de arroz nas propriedades do CCR (Concreto Compactado com Rolo) para seu uso em pavimentos compostos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC. 2009. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2009.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 083. **Agregados - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. Manual de pavimentos de concreto rolado. **Histórico, características tecnológicas, estado-da-arte, materiais, dosagem e normas pertinentes**, Rio de Janeiro, v. 1, 1992.

ENGINEERING AND DESIGN. **Roller-compacted concrete**. US Army Corps of Engineers. 2000.

EVANGELISTA, A.C.J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 219 p. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FEUERBORN, H-J. Coal Combustion Products in Europe-an Update on Production and utilization Standardisation and Regulation. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference**, Denver, CO, USA, 9-12 maio 2013.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 143p., 2005.

FU, X. et al. Studies on blended cement with a large amount of fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 7, p. 11-53, jul. 2002.

TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ, G. et al. Properties, materials and durability of rolled compacted concrete for pavements. University of NIS, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Nis, Serbia, Scientific paper UDC:666.94.4:693.75. **Zastita Materijala**, v. 56, n. 3, p. 345-353, 2015.



GAGNÉ, R. "Proportioning for Non-Air-Entrained RCCP". **Concrete International**, v. 21, n. 5, p. 37-41, 1999.

GALLO, D. F.; PADILHA, J. O. "Experiências em la Pavimentacion com Concreto Compactado com Rodillo en México". **Anais da 25ª Reunião Anual de Pavimentação**, São Paulo – SP, 1991.

GAUTHIER, P. et al. **Conception, formulation, production et mise en oeuvre de revêtements en béton compacté au rouleau**. Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de génie civil, Université Laval, 2000, pagination multiple.

GLASSER, F. P. The pore fluid in portland cement: its composition and role. In: **11<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)**, Durban, South Africa, p. 19-30, 11-16 maio 2003.

GODINHO, D. P. **Características tecnológicas do concreto rolado de pavimentação: experiência brasileira**. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1988.

GROSSI, L. C. **Técnicas atuais de controle tecnológico de qualidade em pavimentações de concreto simples e rolado**. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1989.

GUIDE FOR ROLLER-COMPACTED CONCRETE PAVEMENTS. **National Concrete Pavement Technology Center**, ago. 2010.

HEIDRICH, C.; FEUERBORN, H-J.; WEIR, A. Coal Combustion products: a global Perspective. In: **World of Coal Ash (WOCA) Conference**, Lexington, Kentucky, 22-25 abr. 2013.

HELENE, P. R. L. **Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e características do concreto fresco e endurecido**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Interessado: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). São Paulo, 1998.

HOOPER, W. D.; ASH, H. B. **Marcus Porcius Cato and Marcus Terentius Varro, de Re Rustica**. William Heinemann Ltd, Harvard University Press, London, 1939.

HOPPE FILHO, J. **Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (doutorado). 2008. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

\_\_\_\_\_. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (doutorado). 2008. 247p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HURTADO DÍAS, P. S. **Parâmetros de dosagem do concreto compactado a rolo para pavimentação**. Tese (doutorado). 1993. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

IEA. **International Energy Agency - Clean Coal Centre**. Disponível em: <[www.iea-coal.co.uk](http://www.iea-coal.co.uk)>. Acesso em: 18 fev. 2009.

IECA Instituto Espanol del cemento y sus aplicaciones **Presas de Hormigón compactado**. III Curso de presas de hormigón compactado, Madrid, 1996.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4**: Method of testes for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. Part III Method of tests for steel reinforced concrete. N. 3. Concrete Library of Japan Society of Civil Engineers Japan, jun. 1984.

JOFRÉ, C. et. al. **“RCC pavements in Spain”**. International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Proceedings. West Lafayette, 1989.

KHAYAT, K. H.; LIBRE, N. A. Roller Compacted Concrete: Field Evaluation and Mixture Optimization. **Missouri University of Science and Tecnology**, v. 363, ago. 2014.

KIHARA, Y. O estudo das cinzas volantes brasileiras. **Cerâmica**, v. 32, n. 193, fev. 1986.

Lacerda, D. et al. **Fatores que determinaram o CCR - Concreto compactado com rolo como material para projeto estrutural de barragem do AHE Peixe Angelical**. Trabalho final de graduação, Universidade católica de Goiás, 2006.

MALEK, R. I. et al. The contribution of class-F fly ash to the strength of cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1152-1154, jun. 2005.

MARCHAND, J. et al. Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete—A Review. **ACI Special Publication**, São Paulo, v. 171, p. 457-486, 1997.

MARTINS, D. G. **Influência do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos em Goiânia-GO**. Goiânia: UFG, 2008.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. (ed.). **Lea’s Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. UK: Elsevier, 2007. p. 471-602.

\_\_\_\_\_. Properties and applications of natural pozzolans. In: BENSTED, J.; BARNES, J. P. (eds.). **Structure and performance of cements**. London: Spon Press, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto - Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

\_\_\_\_\_. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MEIRA, L. R. **Propriedades mecânicas e retração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem**. Dissertação (mestrado). 2009. PPGEC – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2009.

MELO NETO, A. A. de; HELENE, P. R. L. **Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos**. São Paulo: IBRACON, 2002.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. United States: Prentice-Hall, 1981.

MORGAN, M. H. **Vitruvius: the ten books on architecture**. Cambridge: Harvard University Press, 1914.

NAIK, T. R.; RAMME, B. W. High-Strength Concrete Containing Large Quantities of Fly Ash. **ACI Materials Journal**, v. 86, n. 2, p. 111-116, mar./abr. 1989.

NANNI, A.; LUDWIG, D.; SHOENBERGER, J. “Roller compacted concrete for highway pavements”. **Concrete International**, v. 18, n. 5, p. 33-38, maio 1996.

NEVILLE, A. M. “**Propriedades do concreto**”. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982.

\_\_\_\_\_; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, E. A. de. **Perspectivas da geração termelétrica a carvão no Brasil no horizonte 2010-2030**. Dissertação (mestrado). 2009. 716p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

OLIVEIRA, P. J.; SALLES, F. M.; ANDRIOLO, F. R. **Studies of Various types of RCC Mix Designs–Laboratory Test Results, Proceedings of the International Symposium Held in Santander**. Spain, on 2, v. 1, IECA – CNEGP, p. 2-4, 4 out. 1995.

PACHECO, J. et al. Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto Considerations of the Modulus of Elasticity of Concrete. In: **Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2014**. IBRACON, out. 2014.

PALMER, W. D. Roller Compacted Concrete Shows Paving Potential. **Roads & Bridges, Scranton Gillette Communications Inc.**, Des Plaines, IL, USA, p. 40-43, Sept. 1987.

PAULON, V. A. et al. “Caracterização do Concreto Compactado com Rolo em Laboratório”. **e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, v. 1, n. 1, p. 66-79, maio 2004.

PAVÌA, S.; CARO, S. An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material. **Constr Build Mater**, v. 22, n. 8, p. 1807–1811, 2008.

PEREIRA, A. H. A.; RODRIGUES, J. A. Incerteza de medição do modulo de Young de materiais por métodos não destrutivos adotando-se um valor estimado para a razão de Poisson. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...**, 2010.

PINTO, P. C. **Investigação de parâmetros do CCR com incorporação de escória granular de alto forno para utilização como base de pavimentos**. Dissertação (mestrado). 2010. USP, 2010.

PITMAN, D.W.; RAGAN, S. A. Drying shrinkage of roller-compacted concrete for pavement applications. In: **ACI Materials Journal**, n. 1, v. 95, jan./fev. 1998.

PITTA, M. R. **Estado del arte de los pavimentos de concreto compactado con rodillo**. ASOCEM - Asociacion de Productores de Cemento, 1994.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 1995.

\_\_\_\_\_; DÍ SILVA, A. J. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza pesada em adição ao concreto compactado com rolo (CCR) detinado a camada de base de pavimentos híbridos**. Dissertação (mestrado). 2006. 141p. UFSC, Florianópolis, 2006.

\_\_\_\_\_; DÍAZ, P. H. Estado del arte de pavimentos de concreto compactado con rodillo. In: **25ª Reunión Anual de Pavimentación**. São Paulo: 1991. p. 605-634.

PLOMMER, H. **Faventinus, Vitruvius and later roman building manuals**. London: Cambridge University Press, 1973.

POPOVICS, S. Effects of uneven moisture Distribution on the Strength of and Wave Velocity in Concrete. **Ultrasonics**, v. 43. p. 429-434, 2005.

ROHDE, G. G. M. (org.) et al. **Cinzas de carvão fossil no Brasil**. v. 1. Aspectos técnicos e ambientais. Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC, 2006.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. Dissertação (mestrado). 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ROLLER-COMPACTED CONCRETE. DEPARTMENT OF THE ARMY. U.S. Army Corps of Engineers CECW-EG Washington, DC 20314-1000. **Engineering and Design Manual n. 1110-2-2006**, 2000.

SACHET, T. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para bases de pavimentos**. Tese (doutorado). 2012. Universidade de São Paulo, 2012.

SALDANHA, R.B. **Misturas cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2014.

SALDANHA, R.B.; CONSOLI, N.C. Accelerated mix design of lime stabilized materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 23(3), 06015012, (DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001437), 2016.

SALDANHA, R.B.; MALLMANN, J.E.C.; CONSOLI, N.C. Salts accelerating strength increase of coal fly ash–carbide lime compacted blends. **Géotechnique Letters**, 6(1), 23-27 (doi:10.1680/jgele.15.00111), 2016.

SALDANHA, R.B.; SCHEUERMANN, H.C.; RIBEIRO, J.L.D.; CONSOLI, N.C. Modelling the influence of density, curing time, amounts of lime and sodium chloride on the durability of compacted geopolymers monolithic walls". **Construction and Building Material**, 136, 65-72, 2017.

SHEHATA, L.D. Deformações instantâneas de concreto. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 633-654.

SILVA, A. J. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza pesada em adição ao concreto compactado com rolo (CCR) destinado a camada de base de pavimentos híbridos**. Dissertação (mestrado). 2006. 141p. UFSC, Florianópolis, 2006.

SILVA, N. I. W. et al. Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. **Cerâmica**, v. 45, n. 296, nov./dez. 1999.

STANDARD PRACTICE FOR CONCRETE PAVEMENTS. Departments of the Army and the Air Force. **Technical Manual, Army TM 5-822-7**, Air Force AFM 88-6, Chapter 8, Appendix D, Departments of the Army and the Air Force, USA, Aug. 1987, p. D-1 to D-15.

TANGO, C E.S. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais. In: **5º International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries**. Florianópolis, p. 21-30, ago. 1994.

TANGTERMSIRIKUL, S.; KAEWKHLUAB, T.; JITVUTIKRAI, P. A compressive strength model for roller compacted concrete with fly ash. **Magazine of Concrete Research**, v. 56, n. 1, p. 35-44, 2004.

TAYLOR, G. J. **Introduction to Roller Compacted Concrete (RCC)**. 2012.

TOFFOLO, R. V. M. **Pavimentos sustentáveis**. Dissertação (Mestrado). 2015. Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2015.

TRICHES, G. **Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: Estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento**. Tese (doutorado). 1993. Instituto Tecnológico de Aeronautica, 1993.

TSENG, Ester. **Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do Rodoanel Metropolitano Mário Covas**. Tese (doutorado). 2010. Universidade de São Paulo.

UCHIKAWA, H. Effect of blending components on hydration and structure formation. In: **8<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)**. Special Reports. Rio de Janeiro, v. 1, p. 249-280, 1986.

USACE. United States Army Corps of Engineers Roller compacted concrete. **Pavement, Design and Construction**. Estados Unidos, 1995.

WALKER, R.; PAVÍA, S. Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. **Materials and Structures**, v. 44, n. 6, p. 1139-1150, jul. 2011.

WOLLE, C.M.; COSTA, R. L. R.; BAUER, L.A.F. Avaliação de características do concreto por ensaios de ultra-som. In: **Revista Politécnica**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

ZANELLA, A. K. **Análise das propriedades mecânicas de concretos para pavimentação empregando diferentes processos de cura.** Dissertação (mestrado). 2014. Universidade Federal de Santa Maria, 2014.